

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy



**Návrh signálního plánu pro řízení provozu na
vybrané křižovatce**

**Signal Plan Proposal for Traffic Control on Chosen
Crossroad**

Student:

Karel Golc

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Teichmann, Ph.D

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Karel Golc**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: **Návrh signálního plánu pro řízení provozu na vybrané křižovatce**
Signal Plan Proposal for Traffic Control on Chosen Crossroad

Zásady pro vypracování:

Osnova práce:

Úvod

1. Význam světelného řízení křižovatek pro dopravu ve městech
 2. Metody pro navrhování pevných signálních plánů
 3. Teoretická východiska řešení
 4. Implementace matematického modelu do podmínek konkrétní křižovatky
 5. Zhodnocení dosažených výsledků, formulace závěrečných doporučení
- Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý, J.; Kluvánek, P.. Základy matematické teorie dopravy. Bratislava: VEDA. 1990. ISBN 80-224-0099-8

Pastor, O.; Tuzar, A.. Teorie dopravních systémů. Praha: ASPI, 2007. 307 s. ISBN 978-80-7357-285-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Karel Golc

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jana Šoupala 1597/1, Ostrava - Poruba, 70800

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto způsobem poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za jeho cenné rady, čas a trpělivost při konzultacích bakalářské práce.

Dále bych touto cestou, také rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Laštůvkovi z Ostravských komunikací, za pomoc při obstarávání podkladů, které byly potřebné, při tvorbě bakalářské práce.

Poděkování náleží rovněž panu Ing. Filipovi Treslerovi za pomoc při grafickém zpracování navrženého signálního plánu a za odborné poznatky z praxe.

V neposlední řadě, toto poděkování patří panu Ing. Radimovi Holušovi za občasnou konzultační činnost při zpracovávání bakalářské práce.

Karel Golc

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Golc, K. *Návrh signálního plánu pro řízení provozu na vybrané křižovatce*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2012, 79 s. Vedoucí práce: Ing. Teichmann, D., Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá návrhem signálního plánu pro řízení provozu na vybrané silně zatížené křižovatce. Úvodní kapitoly se zabývají významem světelného řízení křižovatek pro dopravu ve městech a stručnou analýzou metod pro navrhování pevných signálních plánů. Na závěr kapitoly věnované metodám pro navrhování signálních plánů je proveden výběr vhodné metody, která je v následující části práce popsána. Těžiště práce spočívá v kapitole 4, která je věnována vlastnímu návrhu signálního plánu. Zhodnocení navržených signálních plánů je provedenou v poslední kapitole. V závěrečné části jsou formulována potřebná doporučení.

Klíčová slova: návrh signálního plánu; matematické programování; řízení křižovatky.

ANNOTATION TO THE BACHELOR THESIS

Golc, K. *Signal Plan Proposal for Traffic Control on Chosen Crossroad*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2012, 79 p. Thesis head: Ing. Teichmann, D., Ph.D.

This Bachelor thesis describes the design of signaling traffic management plan for the heavily loaded on the selected intersection. Introductory chapters deal with the importance of light intersections for traffic management in cities and a brief analysis of methods for designing fixed signal plans. At the end of chapters on techniques for signal design plans shall be made choice of a suitable method that is in the following part of the work described. The core work is in Chapter 4, which is paid to actual signal design plan. Summary of the proposed signal plans are made in the last chapter. In the final part are formulated appropriate recommendations.

Keyword: signal plan proposal; mathematical programming; control intersection.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	9
ÚVOD.....	10
1 VÝZNAM SVĚTELNÉHO ŘÍZENÍ KŘIŽOVATEK PRO DOPRAVU VE MĚSTECH.....	11
1.1 Výhody a nevýhody světelně řízených křižovatek.....	12
1.2 Technická základna světelně řízených křižovatek	14
1.3 Signální plán	23
1.3.1 Pevný signální plán	23
1.3.2 Dynamický signální plán	24
2 METODY PRO NAVRHOVÁNÍ PEVNÝCH SIGNÁLNÍCH PLÁNŮ	25
2.1 Metoda saturovaného toku (Websterova metoda).....	26
2.2 Metoda spotřeby času	31
2.3 Iterační metoda.....	33
2.4 Metody založené na simulaci	34
2.5 Metody založené na matematickém programování	34
2.5.1 Dekompoziční přístup	34
2.5.2 Exaktní přístup.....	36
3. TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ	37
3.1 Obecná formulace problému pro použití lineárního matematického modelu.....	37
3.2 Matematický model úlohy	38
3.3 Přípravné etapy před sestavou matematických modelů pro návrh světelného řízení	44
3.4 Řešení sestavených modelů	47
4 IMPLEMENTACE MATEMATICKÉHO MODELU DO PODMÍNEK KONKRÉTNÍ KŘIŽOVATKY	52
4.1 Výběr řešené křižovatky	52
4.2 Vstupní údaje do optimalizačního výpočtu	54
4.2.1 Intenzity účastníků vstupujících do křižovatky v jednotlivých proudech.....	54
4.2.2 Matice mezičasů.....	56
4.2.3 Doby potřebné pro vstup vozidel do křižovatky v saturovaných proudech.....	56
4.2.4 Délka cyklu	57
4.2.5 Hodnota minimální poměrné rezervy	57
4.2.6 Další specifické údaje	57
4.3 Přípravná etapa optimalizačního výpočtu.....	57
4.4 Matematické modely - varianta maximalizace minimální poměrné rezervy.....	61
4.4.1 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s.....	61

4.4.2 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s	62
4.5 Sestavení matematického modelu - varianta minimalizace délky cyklu.....	63
4.5.1 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s	63
4.5.2 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s	64
4.6 Texty programů - varianta maximalizace minimální poměrné rezervy	65
4.6.1 Text programu pro maximalizaci minimální poměrné rezervy při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s	65
4.6.2 Text programu pro maximalizaci minimální poměrné rezervy při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s	66
4.7 Texty programů varianta minimalizace délky cyklu	67
4.7.1 Text programu pro minimalizaci délky cyklu při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s	67
4.7.2 Text programu pro minimalizaci délky cyklu při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s	68
5 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	69
6 ZÁVĚR	76
POUŽITÁ LITERATURA	77

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

A	...	proudově - fázová incidenční matice
a_{ij}	...	prvek proudově- fázové incidenční matice, kde index i představuje proud a index j představuje fázi
c	...	délka cyklu (v optimalizačních modelech) [s]
C	...	délka cyklu (v metodách popisovaných v TP81) [s]
C_{opt}	...	optimální délka cyklu [s]
I	...	množina proudů
m_{ij}	...	mezičas mezi koncem doby zelené pro proud P_i a začátkem doby zelené pro proud P_j
PČR	...	Policie ČR
q_i	...	intenzita vozidel ucházejících se o vstup do křižovatky [$jv \cdot h^{-1}$]
t_i	...	minimální doba zelené [s]
TP 81	...	Technické podmínky - Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu
u	...	minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené pro proud.
x_i	...	začátek doby zelené (počítáno od začátku cyklu) [s]
y_i	...	konec doby zelené (počítáno od začátku cyklu) [s]
Z_j	...	bivalentní proměnná modelující výběr fáze
τ_i	...	minimální doba potřebná pro vstup vozidla do křižovatky v saturovaném proudu[s]

ÚVOD

Díky stále zvyšující se intenzitě provozu na pozemních komunikacích, jsou kritickým místem právě křižovatky, zejména neřízené. Z toho důvodu jsou v těchto typech lokalit mnohem častěji zřizovány světelně řízené křižovatky.

Základním dokumentem, kterým je provoz ve světelně řízené křižovatce organizován, je signální plán.

Hlavním požadavkem při tvorbě signálního plánu pro světelně řízené křižovatky je zlepšení propustnosti ve všech směrech a hlavně bezpečnosti při průjezdu křižovatkou. Pro tvorbu signálního plánu existuje několik metod, z nichž má každá své výhody a nevýhody.

Jednou z nejefektivnějších metod, podle které je navrhován signální plán, je metoda založena na matematickém programování.

Výše uvedená metoda byla použita při tvorbě signálního plánu pro křižovatku, kde se potkávají ulice Opavská a 17. listopadu, která je dopravně velice zatížená a provoz na ní způsobuje komplikace v navazující dopravní síti.

1 VÝZNAM SVĚTELNÉHO ŘÍZENÍ KŘÍŽOVATEK PRO DOPRAVU VE MĚSTECH

V důsledku neustále se zvyšující intenzity provozu na pozemních komunikacích dochází ke vzniku stále většího počtu dopravních nehod (byť nejsou PČR všechny evidovány) zejména v místech vzájemné interakce a výskytu kongescí zejména v intravilánu. Stěžejními úkoly pro městské dopravní inženýry se tak stává zajištění bezpečnosti vozidel v intravilánu, zajištění plynulosti dopravního proudu a zajištění dostatečné kapacity prvků dopravní infrastruktury.

Na silně zatížených křižovatkách ve městech a městských aglomeracích se zatím účelem zřizuje signalizační zařízení, které umožňuje vstup vozidel do kolizních bodů a kolizních ploch řídit a současně také umožňovat vstup do křižovatky vozidlům z vedlejších směrů, který by se v případě silného zatížení hlavních směrů dostávaly do křižovatky velice obtížně. Řízení konfliktních toků se uskutečňuje prostřednictvím postupného umožňování vstupu jednotlivých proudů v průběhu řešeného období. V hustě zatížených částech měst je to navíc obvykle jediné možné řešení, protože díky malému prostoru nelze využít např. pro okružní křižovatky, které by mohly být v určitých případech i lepší variantou.

Výhodnost okružních křižovatek totiž spočívá v zajištění plynulého a bezpečného provozu na všech křižujících se komunikacích a ve společném prostoru mezi nimi, ve kterém dochází ke vzájemným interakcím. Na okružních křižovatkách se vozidla pohybují menšími rychlostmi a tím se stávají bezpečnějšími.

U okružních křižovatek jsou také vyloučeny čelní a kolmé střety vozidel, u průsečných křižovatek (zejména určitých typů) hrozí, že k těmto typům střetů, které jsou z hlediska následků nehod daleko závažnější, bude docházet. Při stavbě okružních křižovatek (zejména malých), dochází totiž ve srovnání s průsečnými křižovatkami ke značnému snížení kolizních bodů.

Kolizním bodem se rozumí místo, kde dochází ke vzájemnému střetu drah vozidel v jednotlivých proudech. Existují tři typy kolizních bodů - křížné, odbočovací a přípojně. Z nich nejzávažnější jsou křížné kolizní body, což jsou body, v nichž se jízdní pruhy navzájem kolmo křížují. Zatímco u typových čtyřramenných průsečných křižovatek běžně existuje 32 kolizních bodů (z nich 16 je křížných 8 odbočných a 8 přípojných), v případě

náhrady uvedeného typu průsečné křižovatky okružní křižovatkou se daří počet kolizních bodů redukovat na 8. Z toho máme 4 odbočovací kolizní body a rovněž také 4 přípojně kolizní body. Křížné body se pak eliminují zcela. K uvedené redukci kolizních bodů, však dochází pouze u malých okružních křižovatek. Např. u okružních křižovatek s dvoupruhovým okružním pásem počet kolizních bodů opět stoupá, a to na 32, což je stejný počet jako u průsečných křižovatek. Ke zvýšení kolizních bodů dochází v důsledku možných průpletů vozidel přejíždějících mezi jednotlivými okružními pásy.

Na okružních křižovatkách se řidiči dobře orientují a mají dobrý přehled o ostatních vozidlech, která se právě na okružní křižovatce pohybují. Při vjezdu do okružní křižovatky, není třeba se zařazovat do pruhu, a dále tyto křižovatky umožňují snadné otáčení vozidel. Ne vždy je však provoz na okružních křižovatkách bezproblémový, má se na mysli bezpečný a plynulý. Bezpečnost a plynulost se neposuzuje pouze podle počtu dopravních nehod, které na dané křižovatce vznikly, ale také pomocí, tzv. nepřímých ukazatelů, např. pomocí počtu konfliktních situací. Literatura [7] uvádí i situace, kdy si řidiči na těchto okružních křižovatkách nepočínali podle pravidel a docházelo tak k ohrožení ostatních účastníků na okružní křižovatce nebo v horším případě k závažnému vzájemnému konfliktu, jehož vyústěním byl vznik dopravní nehody.

V dalším textu bude s ohledem na řešené téma pozornost věnována výhodám a nevýhodám světelně řízených křižovatek.

1.1 Výhody a nevýhody světelně řízených křižovatek

Hlavní výhodou u světelně řízených křižovatek je předávání vizuální informace o aktuální možnosti vstupu účastníků silničního provozu do křižovatky a tedy i zákazu vstupů dvojicím kolizních proudů do křižovatky současně. Vstup pro dvojice kolizních proudů je umožňován podle předem nastaveného časového harmonogramu nebo podle aktuální hustoty dopravy v jednotlivých proudech.

Kromě výše uvedené hlavní výhody, pro kterou se světelné křižovatky zřizují, patří k výhodám také větší variabilita řízení a vyšší kapacita vedlejších směrů zaústěných do křižovatky. Větší variabilitou se v tomto případě rozumí větší proměnlivost a možnost reagovat na vzniklý problém, jakým jsou např. tvořící se kolony v některém z ramen.

Pokud bude světelná signalizace správně naprogramovaná (seřizena), dojde ke snížení průměrného zdržení, které připadá na jedno vozidlo projíždějící křižovatkou.

Obecně platí, že kapacita křižovatky, která je řízena světelnou signalizací, je do značné míry závislá na jejím stavebním uspořádání. Jak již bylo uvedeno výše v textu, patří k základním výhodám také menší náročnost na prostor potřebný k zefektivnění řízení. Světelně řízené křižovatky navíc umožňují vytvořit preferenci pro průjezd vozidel MHD a IZS.

Světelně řízené křižovatky dále umožňují pružně reagovat nejen na dlouhodobé, ale také i krátkodobé změny v dopravě. Dlouhodobou změnou se rozumí např. uzavírka nebo omezení provozu na jednom či více ramenech křižovatky, krátkodobou změnou se rozumí změna propustnosti v jednotlivých směrech v době dopravní špičky nebo dopravního sedla. Za tím účelem je na nejvytíženějších světelných křižovatkách nainstalován kamerový systém, který umožňuje průběžně monitorovat aktuální stav a časový průběh dopravního zatížení a řídit tak provoz nejen z hlediska křižovatky samé, ale také např. i z hlediska většího počtu křižovatek na okolním území. K tomuto účelu se ve větších městech zřizují speciální pracoviště, na která se řízení dopravy centralizují.

Za další výhodu světelně řízených křižovatek lze považovat také fakt, že světelně řízené křižovatky eliminují vznik kolon na vedlejších ramenech křižovatek. Redukcí kolon dále dochází i v důsledku eliminace režimu pomalé jízdy ke snížení spotřeby u automobilů, čímž také dochází i k redukci emisí a v důsledku toho také zlepšení životních podmínek obyvatelstva bydlícího v okolí dopravně silně zatížených lokalit.

V neposlední řadě zvyšuje zřizování světelně řízených křižovatek bezpečnost chodců v těchto lokalitách tím, že vytváří příznivější podmínky pro přecházení pozemních komunikací. Důsledkem zvyšování bezpečnosti dochází ke snížení nehodovosti s chodci na těchto místech.

Může se to jevit jako málo pravděpodobné, ale i světelné řízení může v některých směrech mít negativní dopady. Jeden z důvodů už byl zmíněn výše v textu - existence křížných kolizních bodů, dále může dojít ke zvýšení nehodovosti v podobě nárazu zezadu. Tento fakt se nezdá být tak důležitý, nedojde-li ke ztrátě na životech nebo k těžkým zraněním, ale díky uvedeným drobným nehodám se mohou tvořit kolony a především v místech,

kde není možno v prostoru před křižovatkou vytvořit objízdnu trasu dochází k neočekávaným kongescím, které do okamžiku odstranění následku způsobují blokování komunikace a vytvoření zcela neprůjezdného místa na komunikaci. Obtížně řešitelná průjezdnost místa zablokovaného nehodou pak může být příčinou vzniku nebezpečných manévru účastníku silničního provozu, které mohou vyústit až v řetězovou dopravní nehodu.

Funkční světelné signalizační zařízení na křižovatce v době, kdy není tak silný provoz, tj. v brzkých ranních nebo pozdních večerních hodinách, zdržuje řidiče, kteří musí čekat, až je jim světelnou signalizací umožněn vstup do křižovatky a to i v situacích, kdy se ve zbývajících ramenech nenachází žádné vozidlo.

U světelných křižovatek, které jsou řízeny pevným signálním plánem, který nevhodně určuje časovou polohu jednotlivých světelných signálů na návěstidlech, může docházet v některých ramenech křižovatky k situacím, kdy v některých jízdních pruzích se vytvářejí kolony a přitom jiným proudům je nabízen signál volno i v situacích, kdy se v jízdním pruhu již nenachází žádné vozidlo.

Jako další nevýhodu u světelně řízených křižovatek je možno považovat chybějící návěst Pozor u tramvajových návěstidel. Řidiči tramvají blížících se ke křižovatce, na které je aktivní povolující návěstní znak, musí v případě změny návěstního znaku z povolujícího na zakazující často nečekaně zabrzdít nebo se rozhodnou křižovatkou „na poslední chvíli“ projet, čímž mohou jak ohrozit cestující, tak také vozidla, která vjíždějí do křižovatky z kolizního směru v následující fázi [23].

Mezi nevýhody, lze také zařadit náklady na zřízení, náklady na jejich provoz 24 hodin denně (včetně údržby) a nutnost aktualizací navržených signálních plánů.

1.2 Technická základna světelně řízených křižovatek

Základem světelného řízení na křižovatkách jsou světelná návěstidla. Používají se zejména na křižovatkách pozemních komunikací nebo tramvajových drahách, také však v místech přechodů pro chodce a přejezdů pro cyklisty. Kromě využívání pro světelně řízené křižovatky, se světelná návěstidla dále používají k zabezpečení železničních přejezdů nebo k upozornění na výjezd hasičských vozidel.

Návěstní znaky používané při řízení křižovatek mohou být dvojího druhu - světelné a akustické.

Světelné signály

Význam jednotlivých světelných signálů souvisejících povinností účastníků provozu v křižovatkách stanovuje § 70 až § 74 zákona č. 361/2000 Sb., o silničním provozu, v platném znění. Jelikož se jedná o poměrně známou problematiku bude text věnován světelným signálům obsahovat pouze výčet možných typů signálů.

Podle § 24 a přílohy vyhlášky 30/2001 Sb. se pro řízení na světelných křižovatkách užívají tyto signály:

Signály pro vozidla:

S 1 Tříbarevná soustava s plnými signály

S 1a "Signál s červeným světlem Stůj!"

S 1b "Signál se žlutým světlem Pozor!"

S 1c "Signál se zeleným světlem Volno"

S 2 Tříbarevná soustava se směrovými signály

S 2a "Signál se směrovou šipkou s červeným světlem Stůj!"

S 2b "Signál se směrovou šipkou se žlutým světlem Pozor!"

S 2c "Signál se zelenou směrovou šipkou Volno"

S 3 Tříbarevná soustava s kombinovanými směrovými signály

S 3a "Signál s kombinovanou směrovou šipkou s červeným světlem Stůj!"

S 3b "Signál s kombinovanou směrovou šipkou se žlutým světlem Pozor!"

S 3c "Signál s kombinovanou zelenou směrovou šipkou Volno"

S 4 "Signál žlutého světla ve tvaru chodce"

S 5 "Doplňková zelená šipka"

S 6 "Signál pro opuštění křižovatky"

S 7 "Přerušované žluté světlo"

Tento signál může být i ve tvaru S 4, S 10b nebo S 11b v případě, že je nutno zvlášť upozornit na přecházející chodce anebo přejíždějící cyklisty ve volném směru.

S 8a "Zakázaný vjezd vozidel do jízdního pruhu"

S 8b "Volný vjezd vozidel do jízdního pruhu"

S 8c "Světelná šipka vlevo"

S 8d "Světelná šipka vpravo"

S 8e "Světelný kříž"

Tento signál nám označuje překážku provozu na pozemních komunikacích vedle vozovky

Speciální signály pro chodce a cyklisty:

S 9 Dvoubarevná soustava se signály pro chodce

S 9a "Signál pro chodce se znamením Stůj!"

S 9b "Signál pro chodce se znamením Volno"

S 10 Tříbarevná soustava se signály pro cyklisty.

S 10a "Signál pro cyklisty se znamením Stůj!"

S 10b "Signál pro cyklisty se znamením Pozor!"

S 10c "Signál pro cyklisty se znamením Volno"

S 11 Tříbarevná soustava se signály pro chodce a cyklisty

S 11a "Signál pro chodce a cyklisty se znamením Stůj!"

S 11b "Signál pro chodce a cyklisty se znamením Pozor!"

S 11c "Signál pro chodce a cyklisty se znamením Volno"

S 12a "Rychlostní signál s proměnným signálním znakem"

S 12b "Rychlostní signál s více signálními znaky"

S 13 "Signál dvou vedle sebe umístěných střídavě přerušovaných červených světél"

Signály pro tramvaje:

- S 15a "Stůj" (č. S 15a),
- S 15b "Jízda přímo" (č. S 15b),
- S 15c "Jízda vlevo" (č. S 15c),
- S 15d "Jízda vpravo" (č. S 15d),
- S 15e "Jízda přímo a vpravo" (č. S 15e),
- S 15f "Jízda přímo a vlevo" (č. S 15f),
- S 15g "Jízda vpravo a vlevo"

Signály platné pro tramvaje mohou být použity i pro trolejbusy nebo autobusy městské hromadné dopravy ve vyhrazeném jízdním pruhu.

Moderní trendy v oblasti světelných signálů

K nejnovějším trendům v oblasti světelných signálů patří způsoby upozorňující řidiče nebo chodce na dobu trvání platnosti aktuálního návěstního znaku tzv. návěstidla s odpočtem.

Jedním z možných řešení pro vozidlové proudy je provedení návěstního štítu tak, aby kolem např. červeného světla bylo vytvořeno mezikruží umožňující odečítat zbývající délku doby platnosti návěsti Stůj!. Příklad řešení lze vidět na obr. č. 1.1



Obr. č. 1.1 : Návěstidlo s odpočtem [20]

Řidičům je pak nejen jasné, jak dlouho bude v platnosti návěstní znak Stůj!, daná informace je také využitelná z pohledu přípravy k vjezdu do křižovatky a eliminace nevyužité

doby zelené na začátku intervalu, ve kterém je zelená pro příslušný proud aktivní. Dochází tak ke zvýšení plynulosti provozu a zvýšení kapacity.

Dalším způsob umístění odpočtu, který se používá jak pro chodce, tak pro automobily, lze vidět na obr. č. 1.2, kde je znázorněn případ pro chodce.



Obr. č. 1.2 : Odpočet nad návěstidlem pro chodce [21]

Výhodou tohoto řešení je, že odpočet je dobře viditelný a řidiči vidí, zda už mají brzdit anebo mají ještě dostatek času projet křižovatkou.

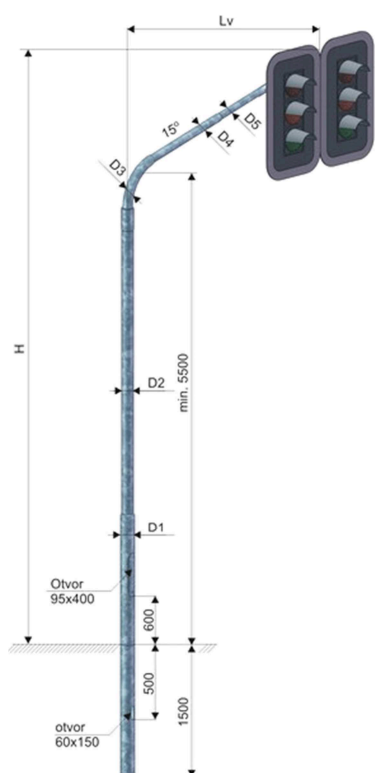
Akustické signály

Následující dva odstavce, byly zpracovány podle [22]. Akustické (zvukové) signály slouží k zajištění bezpečného přecházení vozovky především nevidomým a slabozrakým osobám. Tato návěstidla svým jednoznačným, nezaměnitelným tónem signalizují červenou a zelenou pro chodce. Zařízení musí umožňovat nevidomé osobě, která přistoupila ke stožáru světelného signalizačního zařízení pro chodce, bezpečně sluchově rozlišit, svítí-li ve směru, ve kterém se chystá jít, znamení "Stůj!" nebo signál "Volno".

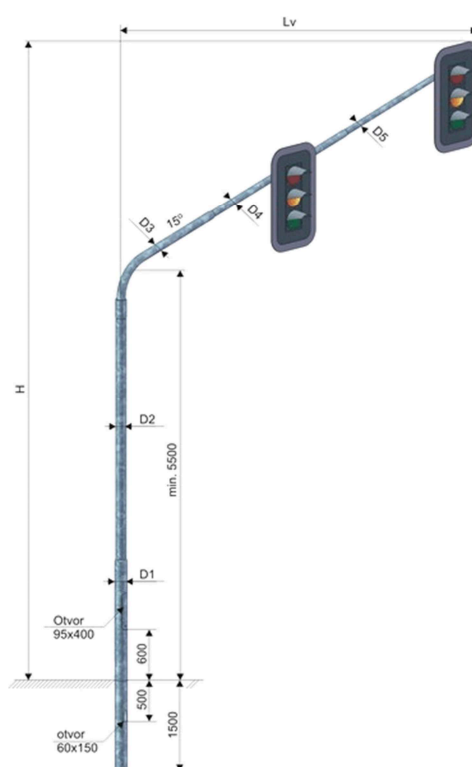
Nejčastěji používaným zvukovým zařízením pro neslyšící na přechodech je akustická signalizace. Při znamení volno je doprovázeno akustickým signálem o kmitočtu 8 Hz což je přibližně 10 tepů za sekundu. Fáze stůj je doprovázena akustickým signálem o kmitočtu 1,5 Hz což je přibližně 2,5 tepů za sekundu.

Nedílnou součástí technického vybavení pro světelné řízení je také doplňková technická infrastruktura, bez které by světelné řízení nemohlo být v provozu. Základním technickým vybavením spadajícím do této kategorie patří nosné konstrukce, na kterých jsou návěstidla umístěna. Návěstidla mohou být zavěšena uprostřed křižovatky na ocelových lanech. Další typem je uchycení na ocelové konstrukce, jejichž typy jsou následující:

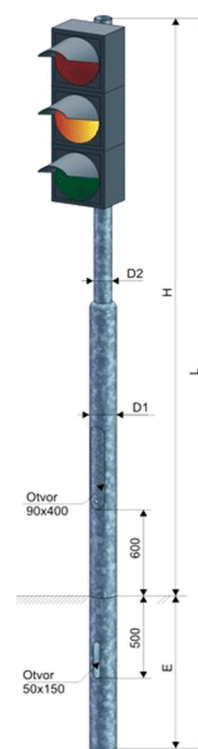
- SL - Signalizační stožár pro zdvojený semafor je uveden na obr. č. 1.3
- ST - Signalizační stožáry pro dva semaforey s rámem je uvede na obr. č. 1.4
- SCH - Signalizační stožár pro chodce - s rámem uveden na obr. č. 1.5



Obr. č. 1.3 : SL [29]



Obr. č. 1.4 : ST [29]



Obr. č. 1.5 :SCH [29]

Technickou základnu pro zavedení světelného řízení tvoří kromě světelných návěstidel a pomocných konstrukcí, na která se světelná návěstidla upevňují, také tzv. řadiče. Řadiče jsou zařízení, která se nacházejí v rozvodné skříni viz obr. č. 1.6 umístěvané zpravidla v blízkosti křižovatky. Většinou se poblíž skřínky s řadičem nachází také sloupek s ovladačem, který je buď přímo na skříni řadiče nebo jde o samostatný sloupek viz obr. č. 1.7. Ovladač umožňuje manuální světelné řízení křižovatky.



Obr. č. 1.6 : Pohled do rozvodné skříně řadiče [19]



Obr. č. 1.7 : Sloupek s ovladačem [25]

Dalším prvkem technické základny světelného řízení jsou chodecká tlačítka. Chodecká tlačítka se umísťují v místech přechodu pro chodce. Samotné tlačítko se nachází ve skříňce umístěvané na konstrukci, na které je umístěno návěstidlo pro chodce. Po stisknutí tlačítka příchozím chodcem se rozsvítí signál „Čekejte“, jak je vidět na obr. č. 1.8



Obr. č. 1.8 chodecká tlačítka [25]

Stisknutím tlačítka dává chodec výzvu řadiči pro zapnutí signálu Volno! pro chodce a Stůj! pro vozidla v proudech, které jsou s daným chodeckým proudem v kolizi. Tento signál se vypíná současně se zapnutím zelené pro chodce. Některá tlačítka jsou taktéž určena speciálně pro nevidomé chodce pro ovládání akustické signalizace. Tato signalizace informuje akustickým způsobem se dvěma různými frekvencemi zapnutí zelené nebo červené pro chodce. Akustická signalizace podstatně zvyšuje bezpečnost nevidomých na přechodech.

Zbývající část podkapitoly byly zpracovány dle [25], [26] a [27].

Světelným signalizačním zařízením lze do jisté míry zajistit vysokou preferenci veřejné dopravy. Aby mohla být umožněna preference vozidel MHD musí dojít k jejich detekci při příjezdu do blízkosti světelného signalizačního zařízení. Setkáváme se dvěma druhy detekce a to aktivní a pasivní. Aktivní detekce je založena na vysílání signálu vozidla do světelného signalizačního zařízení. Aktivní detekce je založena na systému inframaják - radiosignál. Inframaják slouží k definování polohy vozidla ještě před tím, než dojde k přihlášení vozidla k světelnému signalizačnímu zařízení. Přihlašování a odhlašování probíhá prostřednictvím radiostanice. Vozidlo MHD si zároveň automaticky může určit stupeň preference (1-3) podle polohy vůči jízdnímu řádu, která se ověřuje v palubním počítači.

Pasivní detekce neumožňuje preferenci vozidel naopak pouze vozidla snímá, případně zaznamenává jejich průjezd.

Obecně se lze setkat se třemi úrovněmi preferencí - absolutní, podmíněnou a stavem bez preference.

Nejlepších výsledků dosahují světelná signalizační zařízení využívající detekci vozidel a dynamické řízení pro absolutní preferenci vozidel veřejné dopravy. U komplikovaných křižovatek bývá používána podmíněná preference, která výrazněji zohledňuje i ostatní provoz.

V křižovatkách, kde není nutno zajišťovat významně preferenci MHD, se používá systém bez preference veřejné dopravy. Světelná signalizační zařízení pro preferenci veřejné dopravy mohou být použita i v liniových úsecích jako tzv. světelné závory před křížením nebo spojováním proudů vozidel nebo jako ochrana prostoru zastávek.

Pro detekci se podle místních podmínek a technického vývoje využívá celá řada technologií. Např. k detekci tramvají, se používají trolejové detektory, kterých máme několik typů:

- pružinový trolejový kontakt (detektor),
- pryžový trolejový kontakt PTK1,
- dvojité podélné pružiny,
- STOD 1,
- indukční čidlo.

Mezi další detektory nebo snímače patří:

- indukční detektory,
- infračervené detektory,
- videodetekce,
- radiodetekce,
- detekce pomocí indukčních smyček,
- GPS a další.

1.3 Signální plán

Signální plán je nejdůležitější dokument, pomocí něhož se provoz na křižovatkách řídí. Tento dokument určuje časovou polohu jednotlivých světelných signálů na návěstidlech, která jsou zřízena na křižovatce, z čehož plyne také jejich pořadí v průběhu cyklu. Signální plán se vytváří se na základě pravidel silničního provozu, technických norem a jiných legislativních předpisů (resortní technické podmínky) a velice úzce souvisí s uspořádáním dotčené křižovatky. Světelné křižovatky, které se nacházejí blízko vedle sebe, se seřizují do zelené vlny, tzn. že jejich signální plány jsou vzájemně časově koordinovány.

Základním typem informace, kterou je třeba při návrhu signálního plánu zohlednit, je množství vozidel, které se v jednotlivých směrech ucházejí o vstup do křižovatky. Při tvorbě signálního plánu se dále zohledňuje doba reakce řidiče a potřebný čas pro opuštění křižovatky vozidly a chodci - tzv. vyklizovací doba.

Důležité je, zabývat se otázkami stanovení vhodné délky vyklizovací doby. Příliš krátká vyklizovací doba totiž může mít za příčinu vznik nehody vedoucí v lepších případech k zneprůjezdnění části nebo dokonce celé plochy křižovatky, v horších případech k zranění účastníků silničního provozu a v nejhorším případě i k úmrtí osob zúčastněných na dopravní nehodě.

Naopak zase příliš dlouhá vyklizovací doba může vést k vytvoření nežádoucích kolon v prostorách před křižovatkou na straně jedné a na straně druhé nebude zcela využita kapacita křižovatky.

V dopravní se rozlišují dva základní typy signálních plánů [24]:

- a) pevný,
- b) dynamický.

1.3.1 Pevný signální plán

Pevný signální plán je základní možností, jak řídit světelně řízenou křižovatku. V pevném signálním plánu se používají pevné délky cyklů. Existují případy, kdy je pro křižovatku sestaven pouze jeden signální plán, zpravidla se však sestavuje signálních plánů více. Více

signálních plánů se vyskytuje u křižovatek, u kterých se v čase výrazně mění intenzity vozidel přijíždějících z jednotlivých směrů. Pokud existuje více signálních plánů, jsou tyto plány aktivovány podle předem definovaného časového harmonogramu. Zpravidla existují signální plány pro doby dopravních špiček (mohou se vyskytovat samostatné signální plány pro dobu ranní dopravní špičky a dobu odpolední dopravní špičky - zatížení mohou být různá) a pro doby dopravních sedel. Technologie pevných signálních plánů umožňuje vytváření tzv. zelené vlny, v návaznosti cyklů na sousedících křižovatkách. Pevné signální plány omezeně umožňují preferovat průjezd tramvaji a mají nižší flexibilitu v situacích, kdy dojde ke krátkodobým problémům v provozu na křižovatce.

1.3.2 Dynamický signální plán

Dynamický signální plán patří k moderním způsobům řízení světelných křižovatek, kdy se délky zelených pro jednotlivé proudy nebo zařazení jednotlivých fází přizpůsobuje aktuálnímu stavu provozu na základě aktivní i pasivní detekce účastníků a hustoty provozu. Aktivní detekce je založena na vysílání signálu do řadiče (vztahuje se pouze na vozidla MHD). Pasivní detekce naopak jen snímá průjezd vozidel. Pro dynamické signální plány jsou charakteristické proměnné délky fází, různá pořadí nebo vkládání fází na výzvu. Dynamické signální plány umožňují ve srovnání s pevnými signálními plány snížit zdržení a zastavování vozidel před SSZ a zvýšit tak plynulost provozu v silně zatížených směrech. Způsob světelného řízení na základě dynamických signálních plánů umožňuje také významnější preferenci průjezdů tramvají, mají-li autobusy a trolejbusy vyčleněny samostatné jízdní pruhy, potom je možno preferovat i jízdu v těchto pruzích.

I když je křižovatka řízena dynamicky, má vždy vytvořen pevný signální plán. Pevný signální plán bývá u dynamicky řízených křižovatek aktivován v případech, kdy dynamické řízení není z jakéhokoliv důvodu v provozu.

Vhodným podkladem při projektování dynamického řízení je strukturální signální plán. Pro řízení se přímo nepoužívá. Jde o signální plán se strukturálním cyklem, který stanovíme následovně. Strukturální cyklus je cyklus s nejkratší možnou délkou cyklu vůbec, danou minimálními přípustnými zelenými a nejdelšími mezičasy mezi signálními skupinami jednotlivých fází. Je nezávislý na intenzitách provozu. Signální plán se strukturálním cyklem se nazývá strukturální signální plán. Reálné signální plány lze z něho snadno odvozovat prodlužováním jednotlivých fází.

2 METODY PRO NAVRHOVÁNÍ PEVNÝCH SIGNÁLNÍCH PLÁNŮ

Pro každou světelně řízenou křižovatku je se vždy sestaven pevný signální plán a to i tehdy pokud je křižovatka řízena pomocí dynamického signálního plánu. Pevné signální plány se tvoří na základě podmínek TP 81, které vydává Ministerstvo dopravy. Návrh signálního plánu pro řízení provozu na pozemních komunikacích můžeme zhotovit:

- metody saturovaného toku (Websterova metoda),
- metody spotřeby času,
- metody postupného přibližování - iterační metoda,
- simulačních metod,
- metod založenými na matematickém programování.

V TP 81 není nijak specifikováno, která z uvedených metod by měla být použita přednostně. Volba metody je tedy plně v kompetenci řešitele, aniž by mu TP 81 k rozhodování poskytly nějaký návod. První dvě z výše uvedených metod umožňují řešiteli kromě návrhu signálního plánu i přímé posouzení kapacity podle ČSN 73 6102. Zatímco metoda saturovaného toku a metoda spotřeby času jsou principiálně do jisté míry podobné, návrh signálního plánu metodou postupného přibližování (iterační metoda) je založena na odlišném přístupu, který neumožňuje posouzení kapacity postupem podle ČSN. ČSN jednoznačně stanovuje, že do výpočtu kapacity se použije délka zelené prodloužená o 1 sekundu. Tím se připouští, že část vozidel (v souladu s předpisy) vjíždí do křižovatky po skončení signálu volno již v době signálu Pozor.

Návrhová intenzita se stejně jako u ostatních (tj. neřízených pomocí světelného signalizačního zařízení) typů křižovatek zadává jako počet vozidel přepočtený pomocí koeficientů zohledňující skladbu dopravního proudu. Za zmínku stojí skutečnost, že doporučené hodnoty přepočtových koeficientu podle ČSN 73 6102 se liší pro různé typy křižovatek. Přitom ale např. jedním ze závěrů výzkumného projektu [14], který v letech 2005-2008 řešil výpočet kapacity okružních křižovatek, bylo doporučení sjednotit přepočtové koeficienty skladby dopravního proudu u okružních křižovatek s koeficienty používanými pro neřízené průsečné a stykové křižovatky.

Přehled platné metodiky posuzování kapacity řízených křižovatek byl zpracován podle [16]

2.1 Metoda saturovaného toku (Websterova metoda) [17]

Websterova metoda se používá nejčastěji a je proto rozepsána nejpodrobněji. Základem této metody je stanovení délky cyklu a signálu volno v závislosti na stupních saturace vjezdu v jednotlivých fázích. Stupněm saturace se pro potřeby Websterovy metody rozumí součet nejvyšších stupňů saturace kritických vjezdu z jednotlivých fázích. Základním výpočtovým obdobím pro kapacitní posouzení pomocí této metody je vždy jedna hodina. Navržený signální plán je vyhovující v případě, kdy je kapacita na všech vjezdech vyšší než intenzita. Základním pojmem využívaným ve Websterově metodě je tzv. saturovaný tok. Saturovaný tok je nejvyšší počet vozidel, která mohou projet profilem stopčáry za jednu hodinu bez omezení, tzn. za jednu hodinu zelené. Kapacita řadicího pruhu je kapacita na stopčáře neovlivňovaná protisměrem, tj. s výjimkou levých odbočení ovlivňovaných současně jedoucím protisměrem ve stejné fázi. Saturovaný tok se nepočítá pro samostatné tramvajové vjezdy. Velikost saturovaného toku závisí především na šířce vjezdu, podélném sklonu komunikace, poloměru oblouku a podílu odbočujících vozidel.

Při stanovování délky cyklu se podle v TP 81 uvedeném vzorci pro všechny vjezdy s automobilovou dopravou nejdříve určí stupeň saturace, a to na základě intenzity vjezdu a hodnoty saturovaného toku vjezdu. Ostatní vjezdy (tj. vjezdy týkající se tramvajové dopravy a vstupy pěších proudů) se neuvažují. V každé fázi (fází rozumíme časový interval, ve kterém mají současně volno určité, zpravidla nekolizní dopravní proudy na křižovatce) se vybere vjezd s nejvyšším stupněm saturace, tedy kritický vjezd ve fázi. Při řešení světelného signalizačního zařízení Websterovou metodou je nutno stanovit tzv. fázové schéma, tj. přiřazení dopravních pohybů jednotlivým fázím a nejvýhodnější pořadí fází. Při návrhu schématu fází se vychází ze situačního řešení a geometrických poměrů v křižovatce, z organizace dopravy (např. požadavek na preferenci MHD) a z intenzit provozu.

Počet fází vyplývá z rozdělení fází, tj. z rozhodnutí o rozčlenění dopravních pohybů na křižovatce. Minimální počet fází jsou 2, přičemž odbočující dopravní proudy nejsou bezkolizní proti přímým směrům. Dokonale bezkolizní řízení vyžaduje na čtyřramenné křižovatce minimálně 4 fáze.

Přednostně by se mělo navrhovat jednoduché (dvoufázové) řízení, protože vícefázové řízení snižuje kapacitu křižovatky, zvyšuje ztrátové časy a prodlužuje zdržení vozidel. Vícefázové řízení by se mělo navrhovat jen v odůvodněných případech (např. nehodové křižovatky, velmi silná intenzita vlevo odbočujících vozidel).

Pořadí fází u vícefázového řízení se navrhuje tak, aby zelené ve fázích na sebe logicky plynule navazovaly a aby se minimalizoval součet mezičasů. Součet stupňů saturace kritických vjezdů v jednotlivých fázích udává celkový stupeň saturace.

Pro každou fázi se následně určuje ztrátový čas. Ztrátový čas vychází z předpokladu, že v každé fázi se nachází produktivní, tzv. efektivní zelená. Je to doba, po kterou vozidla projíždějí stopčárou v saturovaném toku. Dobu efektivní zelené vypočítáme následovně. Nejdříve od délky zelené odečteme časovou ztrátu vzniklou rozjezdem a následně tento vypočítaný rozdíl sečteme s délkou žluté.

Ztrátový čas pro každou fázi je doba mezi koncem efektivní zelené v této fázi a začátkem efektivní zelené v následující fázi, tj. neproduktivní doba při změně fází. Je roven mezičasu zkrácenému o rozdíl mezi efektivní a skutečnou zelenou.

Ztrátový čas pro každou fázi se určuje vždy podle skutečného mezičasu mezi kritickými vjezdy v končící a následující fázi podle strukturálního signálního plánu. Součet ztrátových časů pro každou fázi je celkový ztrátový čas za cyklus.

Návrh minimálního cyklu (pro zadané intenzity).

Minimální cyklus pro zadané intenzity je nejkratší možná délka cyklu pro požadovanou rezervu kapacity v procentech na kritických vjezdech ve fázích. Závisí na fázovém schématu, mezičasech, intenzitách a požadované rezervě kapacity. K výpočtu minimálního cyklu potřebujeme znát celkový ztrátový čas za cyklus, celkový stupeň saturace a rezervu kapacity vjezdu. Signální plán s minimálním cyklem pro zadané intenzity se nazývá minimální signální plán.

Minimální cyklus se přímo pro řízení nepoužívá. Jeho výpočet je vhodným podkladem ze dvou důvodů. V první řadě je důležitý pro posouzení, zda dopravní řešení křižovatky kapacitně vyhoví daným intenzitám. Při minimální délce cyklu je rezerva kapacity vjezdu

nulová. Pokud vyjde hodnota minimálního cyklu větší, než 120 s, pak světelné signalizační zařízení kapacitně nevyhovuje ani při maximální délce cyklu a je nutné hledat jiné dopravní řešení.

Druhým důvodem, pro který se minimální cyklus počítá, je rozhodování o délce cyklu při návrhu koordinace světelně signalizačního zařízení. Minimální cyklus udává nejkratší možnou délku cyklu pro příslušnou křižovatku, s níž je možné uvažovat při návrhu koordinace, aby při daném fázovém schématu, mezičasech a intenzitách křižovatka kapacitně vyhověla pro zadanou rezervu kapacity. Minimální cyklus pro reálné použití nemůže být kratší než strukturální cyklus (viz. kapitola č. 1.3.2 o dynamickém řízení).

Návrh optimálního a reálného cyklu navrženého metodou saturovaného toku v podmínkách izolované křižovatky.

Optimální cyklus pro izolovanou křižovatku je takový cyklus, při němž je celkové zdržení náhodně přijíždějících vozidel automobilové dopravy za daných podmínek minimální. Závisí na schématu fází, mezičasech a na intenzitách provozu. Pro výpočet optimálního cyklu je třeba znát celkový ztrátový čas za cyklus a také celkový stupeň saturace. Optimální cyklus slouží jako základ pro návrh reálného cyklu na izolované křižovatce. Vypočtený optimální cyklus se v praxi často musí upravit na reálný cyklus a to především s ohledem na tramvaje a dlouhé vyklizovací časy chodců na přechodech.

Na základě vypočteného optimálního cyklu je možné navrhnout reálný cyklus v rozmezí:

$$0,75 \cdot C_{opt} < C < 1,5 \cdot C_{opt}$$

neboť v tomto rozmezí platí, že reálný cyklus se blíží cyklu optimálnímu a časové ztráty náhodně přijíždějících vozidel se podstatněji nemění. Reálný cyklus nemůže být kratší než strukturální cyklus (viz. kapitola č. 1.3.2 o dynamickém řízení).

Délky reálných cyklů pro řízení nemají být větší než 100 s, výjimečně lze připustit délku cyklu do 120 s. Při pevných délkách cyklu větších než 120 s vzrůstá nadměrné zdržení. Pokud je to účelné, může se při dynamickém vícefázovém řízení s proměnnou délkou cyklu použít i větší délka cyklu.

Výpočet délek signálu volno – zelených pro izolované křižovatky

Při navrhování zelených pro izolované křižovatky se nejprve určí délky zelených pro kritické vjezdy v jednotlivých fázích. Pro výpočet je třeba znát stupeň saturace vjezdu, celkový stupeň saturace, celkový ztrátový čas za cyklus a cyklus. Tyto zelené kritických vjezdů v jednotlivých fázích určují optimální délky jednotlivých fází signálního plánu.

K vypočteným délkám zelených pro kritické vjezdy se pak podle tabulky mezičasu dopočítají délky zelených ostatních nekritických vjezdů automobilové dopravy, dále délky signálů volno tramvají, chodců a signálu pro cyklisty.

Návrh zelených pro křižovatky v koordinaci.

Návrh se zásadně liší od postupu pro izolované křižovatky. Celkové řešení je optimální tehdy, pokud vychází z priority koordinovaných směrů i za cenu určitého znevýhodnění příčných nekoordinovaných vjezdů, neboť obvykle se při kvalitní koordinaci dosáhne takového poklesu zdržení a zastavení v koordinovaných směrech, že i při případném znevýhodnění příčných nekoordinovaných vjezdů se obecně celková plynulost provozu ve srovnání s izolovaným nekoordinovaným řízením výrazně zvýší.

Nejprve se určí délky zelených pro koordinované směry. Navrhují se tak, aby kapacitně vyhovovaly intenzitám v koordinovaných směrech s určitou rezervou alespoň 15 až 20 %. Dále se určí polohy zelených pro koordinované směry v signálním plánu. Tyto polohy vyplývají z časově prostorové polohy koordinovaných svazků v diagramu dráha - čas podle navržené koordinace. Délky a polohy zelených pro koordinované směry udávají čas v cyklu, nutný pro koordinaci. Jde o dobu od začátku zelené v jednom směru do konce zelené ve druhém směru, tedy jejich součet.

Čas nutný pro koordinaci a k němu příslušné mezičasy se odečtou od délky cyklu. Tím se získá časový prostor pro délky zelených pro příčné nekoordinované vjezdy. Délky zelených pro tyto vjezdy se navrhují v rámci tohoto prostoru. Musí být přitom splněna podmínka, aby i tyto zelené kapacitně vyhovovaly s určitou rezervou, doporučuje se rezerva alespoň 10 %.

Návrh minimálních dob zelených (pro zadané intenzity).

Minimální doba zelené pro danou intenzitu vjezdu a délku cyklu je nejkratší možná délka pro automobilovou dopravu tak, aby kapacitně vyhověla s požadovanou rezervou. K určení minimálních zelených je třeba znát intenzity vjezdu, cyklus, saturovaný vtok vjezdu a rezervu kapacity vjezdu. Rezerva kapacity vjezdu musí být minimálně rovna nula procentům. Vypočtené minimální zelené se zaokrouhlují na celé sekundy vždy nahoru.

Výpočet minimální zelené je vhodným podkladem pro:

- návrh zelených na světelném signalizačním zařízení v koordinaci,
- návrh zelených nepreferovaných vjezdů v případě, že je účelné zvýhodnit určité vjezdy např. preference MHD na úkor jiných vjezdů,
- návrh zelených v minimálním cyklu vypočteném podle minimálního cyklu,
- stanovená mezních hodnot při projektování dynamického řízení.

Posouzení návrhu

Kvantitativním hlediskem dopravních řešení světelného signalizačního zařízení je kapacita křižovatky. Posouzení se provede tak, že se porovnají intenzity dopravy vjezdů na křižovatce s kapacitami těchto vjezdů a vypočte se rezerva kapacity. Z těchto veličin se pak může určit např. nejmenší přípustná délka řadících pruhů pro jednotlivé směry jízdy. Pro výpočet rezervy kapacity vjezdu je třeba znát intenzity vjezdu a kapacity vjezdu.

Kapacita vjezdů na řízené křižovatce se počítá pro každý vjezd zvlášť. Výpočet se provádí pro základní interval jedné hodiny. Dopravní řešení světelného signalizačního řešení je vyhovující tehdy, jestliže na všech vjezdech je kapacita vyšší než intenzita, to znamená rezerva kapacity je kladná.

Kapacitu vjezdu pro automobilovou dopravu stanovíme na základě saturovaného toku vjezdu, délky efektivní zelené a cyklu. Při stanovování kapacity vjezdu pro tramvaje se používá specifický přístup. Hodnoty potřebné pro výpočet je vhodné upřesnit ve spolupráci s provozovatelem dráhy, protože se mohou v jednotlivých případech značně lišit.

Délka řadících pruhů

Je doplňující hodnotou získanou při návrhu signálního plánu Websterovou metodou. Nejmenší přípustná délka řadících pruhů se vypočte pro každý řadící pruh zvlášť nezávisle na použitých signálech, ať jde o plné či směrové s výjimkou řadících pruhů stejného směru jízdy, které se počítají společně. K výpočtu se použije nejdelší navržený cyklus pro řízení. Délka pruhů pro odbočení má být pokud možno větší než vypočtená nutná délka sousedního řadícího pruhu (pro jízdu přímo), aby odbočující vozidla mohla do svého řadícího pruhu zajíždět bez omezení. Toto je důležité respektovat zejména při vícefázovém řízení s použitím směrových signálů.

Při náhodném příjezdu vozidel pro daný směr jízdy nebo pro ten směr jízdy, který je alespoň částečně v koordinaci (má signál volno alespoň částečně v časové poloze koordinovaného svazku vozidel) potřebuje pro výpočet délky řadícího pruhu znát intenzitu vjezdu, počet cyklů za hodinu, cyklus, efektivní délku zelené a délku jednotkového vozidla včetně mezery. Naopak pro ty jízdy, v nichž zastaví všechna vozidla se nejmenší přípustná délka řadícího pruhu vypočte z intenzity, délky cyklu a délky jednotkového vozidla včetně mezery. Vztahy dávají správný a úplný výsledek za předpokladu, že rezerva kapacity řadícího pruhu je kladná nebo alespoň nulová.

Délku fronty za špičkovou hodinu stanovíme z intenzity, efektivní délky zelené, délky cyklu, saturovaného toku vjezdu a délky jednotkového vozidla včetně mezery.

Nutná délka řadícího pruhu se vypočte z průměrné intenzity, saturovaného toku vjezdu, efektivní délky zelené, délky cyklu, délky jednotkového vozidla včetně mezery, nejmenší přípustná délka řadícího pruhu a z počtu hodin za sebou, kdy je rezerva kapacity záporná.

2.2 Metoda spotřeby času [18]

Další metodou, kterou lze použít pro výpočet kapacity křižovatky řízené světelným signalizačním zařízením, je metoda spotřeby času. Při této metodě se intenzita jednotlivých dopravních směrů upravuje vynásobením koeficientem faktoru omezení, kterým se zohledňují vlivy na zpomalení nebo na zrychlení pohybu vozidla při průjezdu vozidla křižovatkou. Toto fiktivní, tzv. výpočtové zatížení se zavádí do výpočtu délky cyklu a jednotlivých zelených fází.

Výpočtové zatížení se vypočítá na základě intenzity určitého dopravního směru, výsledného koeficientu faktoru omezení pro předmětný dopravní směr a na počtu řadicích pruhů tohoto směru.

Koeficient faktoru omezení přitom závisí na:

- šířce řadicího pruhu,
- sklonových poměrech,
- poloměru odbočování,
- skutečnosti, zda vozidla jedoucí v jednom jízdním pruhu odbočují anebo jedou přímo,
- počtu řadicích pruhů pro tentýž směr na jednom vjezdu,
- vozidlech odbočujících současně s přecházejícími chodci.

Jestliže se pro jednu dopravní skupinu vyskytuje více druhů koeficientů faktoru omezení, výsledného koeficientu se dosáhne jejich vynásobením, maximální povolená hodnota koeficientu je však 1,43. Překročí-li hodnota součinu hodnotu 1,43, uvažuje se v dalších výpočtech s touto maximální hodnotou.

Délka cyklu se vypočítá s využitím součtu rozhodujících mezičasů mezi jednotlivými fázemi za cyklus, součtu výpočtových zatížení rozhodujících pro každou fázi, saturovaného toku a délky cyklu. Vztah pro výpočet je uveden v [16].

V rámci jedné křižovatky se uvažuje hodnota saturovaného toku konstantní a to v rozmezí 1400-1900 $\text{jv}\cdot\text{h}^{-1}$. Nižší hodnoty se uplatňují zpravidla v podmínkách obcí, případně, kde se světelná signalizace teprve zavádí. Hodnotu výpočtového cyklu lze podle místních podmínek zvýšit o 5-10 %.

Délka zelené i-té signální skupiny se vypočítá z výpočtového cyklu, saturovaného toku a z výpočtového zatížení pro i-tou signální skupinu.

Kapacitu vjezdu vypočteme ze saturovaného toku, výpočtového cyklu a z délky zelené. V případě této metody je však vztah pro výpočet kapacity vjezdu totožný s metodou saturovaného toku. Liší se pouze v principu stanovení optimálního cyklu a délek zelených.

2.3 Iterační metoda

Následující odstavec byl zpracován podle [13]. Metoda postupného přibližování - iterační metoda uvedena v [18] popisuje kapacitní zhodnocení křižovatky. Používá se především při návrhu nového signálního plánu, kdy jsou kapacity příslušných radících pruhu porovnávány s příslušnými intenzitami dopravních proudů na řešené křižovatce. Tomu ale nejprve předchází určení délky strukturálního cyklu z minimálních zelených a nejdelších rozhodujících mezičasu. Tyto hodnoty jsou postupně navyšovány a v každém kroku jsou přepočítávány kapacity, které se pak porovnávají s intenzitami dopravních proudů, dokud kapacita nepřevyšuje o 10 až 20 % směrodatné intenzity [17].

Vstupními údaji jsou vstupní časy pro motorová vozidla podle tabulky, ve které jsou zaznamenány počty vozidel za cyklus, druhy pohybů a prostorové uspořádání křižovatky. Druhem pohybu může být buď směr jízdy přímo nebo kombinace směru přímo a vpravo, přímo a vlevo s podílem odbočujících vozidel do 20% nebo s prostorem pro hromadění vozidel a to na křižovatce s příznivým prostorovým a rozhledovým uspořádáním a se sklonem vjezdů nejvýše +4 %. Pro kapacitní posouzení potřebujeme znát součin počtu cyklů za hodinu a počty vozidel za cyklus.

Jestliže nejsou k dispozici podrobné informace o signálním plánu nebo je-li třeba pouze přibližně odhadnout výkonnost křižovatky řízené SSZ, lze využít metodu tzv. součtu konfliktních proudů, která je popsána v [9].

Iterační metody umožňují řešit soustavy lineárních rovnic pomocí postupného přibližování k přesnému řešení.

Následující odstavec byl zpracován podle [28]. Podstatou iteračních metod pro hledání odhadu je postupné přibližování se optimálnímu řešení, přičemž za výchozí odhad je obvykle brána vhodná "rozumná" hodnota, tj. vhodná aproximace odhadu. Metody pro přiblížení se řešení se mohou vzájemně lišit a jejich účinnost závisí na vlastnostech věrohodnostní funkce. Zejména je zapotřebí ošetřit, aby použitá numerická metoda konvergovala ke skutečnému řešení, tj. aby v případě složité věrohodnostní funkce neskončila v některém z lokálních maxim.

2.4 Metody založené na simulaci

Simulace je dalším z možných přístupů při navrhování signálních plánů světelně řízených křižovatek. Za účelem využití simulace je na trhu k dispozici celá řada specializovaných software, sestavených na různé úrovni. Uvedené software umožňují modelovat různé typy provozních situací v modelovaných křižovatkách k velice rozšířeným software se řadí:

- Lisa +,
- PTV VISSIM zpracovaný v [6],
- Aimsun,
- OmniTRANS,
- Paramics.

Kromě specializovaných software je možno signální plány navrhovat i s využitím univerzálních software, k takovým se řadí např. software WITNESS zpracovaný v [3]. Do oblasti simulačních nástrojů je možno zařadit také metody založené na využívání Petriho sítí uvedené v [11].

2.5 Metody založené na matematickém programování

Následující kapitola byla zpracována dle [5]

2.5.1 Dekompoziční přístup

Tento postup pro návrh signálních plánů křižovatek navrhnul v minulosti tým výzkumníků Vysokého ústavu dopravního v Žilině pod vedením prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dr.h.c. a přístup byl publikován např. v [2]. Vzhledem k omezeným možnostem výpočetní techniky v tehdejší době bylo nutné úlohu rozdělit na tři oddělené podúlohy.

V první podúloze je zapotřebí množinu proudů P_1, P_2, \dots, P_n vyskytujících se na řešené křižovatce pokrýt minimální soustavou maximálních podmnožin vzájemně nekolizních proudů, tzn. vytvořit fáze. Tato podúloha je řešena ve dvou krocích.

V prvním kroku se na základě poznatků z teorie grafů vyhledá soustava všech maximálních podmnožin nekolizních proudů. V některých případech, kdy nejsou křižovatky tak náročné, lze tuto úlohu vyřešit poměrně snadno, a to prohledáním grafu bezkoliznosti.

V případě, že jsou křižovatky již náročnější lze k řešení úlohy o vyhledání maximálních podmnožin nekolizních proudů použít účinný přístup založený na úloze o barvení grafu, jehož autorem je doc. RNDr. Štefan Peško, CSc., jak je uvedeno např. v [10].

Úkolem druhého kroku je z vytvořené množiny vybrat minimální počet podmnožin, které představují výsledné fáze křižovatky. Při řešení úlohy je třeba dávat pozor na to, aby každý dopravní proud vstupující do křižovatky byl obsažen alespoň v jedné z výsledných fází. K tomuto účelu byl sestaven jednoduchý model lineárního programování, viz např. [2].

Cílem druhé podúlohy je optimální seřazení vybraných fází. Optimalizačním kritériem je součet rozhodujících mezikasů mezi fázemi. Toto kritérium je potřeba minimalizovat, čímž se také minimalizuje součet neproduktivního času křižovatky. K vyřešení této podúlohy lze použít Littlův algoritmus pro vyhledání minimální Hamiltonovy kružnice v obyčejném digrafu. Výstupem této podúlohy je fixace pořadí fází.

Třetí podúloha stanovuje optimální časy začátků a konců zelených v průběhu cyklu pro všechny proudy s ohledem na jejich zafixované pořadí z předchozí podúlohy. Tento úkol je řešen pomocí modelu lineárního programování se zvoleným optimalizačním kritériem. Model obsahuje dvě základní skupiny proměnných, které mohou být jak nezáporné celočíselné, tak i z oboru nezáporných reálných hodnot. Tyto proměnné představují časy začátků a konců dob zelených pro jednotlivé proudy. Další proměnná reprezentuje optimalizovanou veličinu. Může jí být délka cyklu, nebo minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené pro proud (dále jen minimální poměrná rezerva). Je-li optimalizačním kritériem délka cyklu, v průběhu optimalizačního výpočtu se její hodnota minimalizuje. Rozhodujícím dopravním proudům ve fázích jsou zde přiřazeny pouze minimální doby zelených pro průjezd zadané intenzity vozidel (je-li hodnota výše uvedené poměrné rezervy rovna jedné). Je-li optimalizačním kritériem minimální poměrná rezerva při zvolené délce cyklu, potom se v průběhu optimalizačního výpočtu její hodnota maximalizuje. Minimální poměrná rezerva je hodnota minimálního poměru mezi nabízeným časem, v němž je umožněn vstup dopravního proudu do křižovatky, a požadovanou dobou pro tento proud.

Model řešený ve třetí podúloze je však natolik univerzální, že umožňuje zakomponovat i jiná optimalizační kritéria, např. součet délek čekajících vozidel v rámci jednoho cyklu, jehož hodnota se v průběhu optimalizačního výpočtu při zvolené délce cyklu minimalizuje. Model umožňuje i optimalizace podle vhodně zvolené vícekritériální účelové funkce.

2.5.2 Exaktní přístup

Tento přístup byl popsán v práci [8], která byla vedena prof. RNDr. Jaroslavem Janáčkem, CSc. Ve srovnání s předchozím přístupem probíhá řešení celé úlohy pouze v rámci jediného optimalizačního výpočtu - řešením modelu celočíselného, nebo smíšeného celočíselného lineárního programování, což je ovšem ve srovnání s předchozím přístupem výrazně složitější zejména po stránce konstrukce modelu.

Model obsahuje stejné proměnné jako v případě třetí podlohy u dekompozičního přístupu. Kromě nich jsou k vytvoření modelu zapotřebí ještě další dvě množiny bivalentních proměnných, které se vztahují k pořadí začátků a konců dob zelených a pořadí začátků a konců mezičasů. I zde je možné použít v modelu různá optimalizační kritéria, a to při žádných nebo minimálních úpravách soustavy omezujících podmínek modelu. Všechny uvedené modely zahrnuté pod exaktní přístup umožňují libovolnou polohu doby zelené i mezičasů v cyklu i na rozhraní dvou po sobě následujících cyklů. Tato skutečnost znamená, že optimální signální plán se vyskytuje v poměrně velkém počtu variant. Rozdíly mezi nimi spočívají pouze v umístění dob zelených na časové ose cyklu. Odlišnosti jednotlivých řešení nejenže nemají rozdílnou interpretaci, nijak ani nezmění hodnotu účelové funkce.

U modelů exaktního přístupu jsou očekávány delší výpočetní časy, proto je žádoucí zamezit uvedenému duplikování přípustných řešení a omezit tak prohledávanou množinu přípustných řešení. Tohoto požadavku lze docílit fixací polohy právě jednoho proudu, pomocí přednastavení hodnoty jedné proměnné modelující čas začátku nebo konce doby zelené. Optimalizační výpočet u reálných úloh pomocí exaktního přístupu je však zpravidla možný až při použití dostatečně výkonné výpočetní techniky a s použitím dostatečně výkonných optimalizačních software.

3. TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ

Všechny metody sloužící k návrhu signálního plánu redukuje problém na návrh doby zelené. Signály všech ostatních barev se odvíjejí od uvedeného výsledku. V odborné literatuře existuje celá řada metod, které se pro návrh signálního plánu používají. V praxi se nejčastěji používá metoda saturovaného toku, metoda matematického programování a metoda spotřeby času. Všechny ze zmíněných metod jsou zpracovány v Technických podmínkách TP 81 schválených Ministerstvem dopravy ČR a vydaných pod názvem „Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích“. Existují však i jiné metody, které nejenže ponechávají v platnosti výhody výše zmiňovaných metod, ale mají ještě další výhody. Pro jejich aplikaci jsou však vyžadovány hlubší teoretické znalosti z oblasti operační analýzy. Takovou metodou je např. metoda návrhu signálního plánu pomocí lineárního matematického modelu, jejímž autorem je řešitelský tým někdejšího Výzkumného ústavu dopravního vedený prof. RNDr. Janem Černým, DrSc., Dr.h.c.. Zatímco výsledky ostatních metod řešitele pouze informují o tom, jak dlouho bude doba zeleného signálu pro jednotlivé proudy trvat a časovou polohu dob zelených udávají pouze rámcově (plyne ze zvoleného pořadí fází), v případě metod sestavených na bázi lineárního programování dostává řešitel z výstupu modelu jednoznačné informace o začátcích a koncích dob zelených pro jednotlivé proudy. Při použití této metody je tedy schopen na základě dosažených výsledků bez větších obtíží přímo sestavit signální plán (což u předchozích metod je pracnější, protože je známa pouze délka zelených a orientační umístění dob zelených jednotlivých proudů v jednotlivých fázích v průběhu cyklu).

3.1 Obecná formulace problému pro použití lineárního matematického modelu

Je dána množina proudů vstupujících do křižovatky I . Pro každý proud $i \in I$ je známa hodinová intenzita q_i vyjádřená v jednotkových vozidlech (pojem jednotkové vozidlo se zavádí pro zjednodušení kapacitních výpočtů). Pro každý proud dále známe minimální dobu zelené t_i a dobu potřebnou pro vstup vozidla křižovatky v saturovaném toku τ_i . Dále je k dispozici matice mezičasů M . Mezičas m_{ij} je doba stanovená pro dvojice kolizních proudů a vyjadřuje časový odstup mezi koncem doby zelené pro první z dvojice kolizních proudů $i \in I$ a začátkem doby zelené pro druhý z dvojice kolizních proudů $j \in I$. U některých modelů patří ke vstupním hodnotám také doba cyklu c , pro některé modely bude ke vstupním

hodnotám patří hodnota minimální poměrné rezervy u . Znalost uvedených hodnot souvisí s volbou optimalizačního kritéria (viz dále). Úkolem je rozhodnout o začátcích a koncích do zelených pro jednotlivé proudy tak, aby se buď při známé hodnotě minimální poměrné rezervy minimalizovala délka cyklu, nebo aby se při známé délce cyklu maximalizovala hodnota výše uvedené minimální poměrné rezervy.

$$\text{Poměrná rezerva} = \frac{\text{nabízená doba zelené za cyklus}}{\text{požadovaná délka zelené doby za cyklus}}$$

Aby bylo řízení křižovatky uspokojující musí platit, že hodnota poměrné rezervy pro každý proud bude minimálně 1. Po vyřešení úlohy je velice důležitou otázkou otázka interpretace dosaženého řešení. Jestliže hodnota minimální poměrné rezervy bude např. 1,4, bude to znamenat, že nabízená doba zelené pro každý proud je minimálně 1,4 násobek té doby, která je průměrně požadována. Informace o intenzitách vozidel vstupujících do křižovatky v jednotlivých proudech může být nahrazena i jinou hodnotou (např. intenzitou zvýšenou o určité procento reprezentující rezervu do budoucna nebo rezervu na vykrytí většího rozptylu v počtech vozidel přijíždějících za hodinu). Zohlednění jiné hodnoty než intenzity může při minimalizaci délky cyklu také proběhnout prostřednictvím zvýšení hodnoty minimální poměrné rezervy.

3.2 Matematický model úlohy

Za účelem modelování rozhodnutí vyplývajících ze zadání úlohy, se do modelu zavedou následující proměnné:

x_i	...	začátek doby zelené pro proud $i \in I$
y_i	...	konec doby zelené pro proud $i \in I$
u	...	minimální poměrná rezerva (ve variantě modelu, kde se její hodnota maximalizuje)
c	...	délka cyklu (ve variantě modelu, kde se její hodnota minimalizuje)

Definičními obory proměnných modelujících začátky a konce dob zelených pro jednotlivé proudy mohou být množiny nezáporných nebo celých nezáporných čísel. V případě proměnné modelující délku cyklu přichází v úvahu opět buď množina nezáporných, nebo nezáporných celých čísel, v případě proměnné modelující hodnotu minimální poměrné

rezervy přichází v úvahu pouze množina nezáporných čísel. Definiční obor - množina celých nezáporných čísel, je sice pro řešení přípustný, ale není vhodný. Uvedená volba definičního oboru - množiny nezáporných čísel u posledního typu proměnné se dá zdůvodnit následovně. Kdyby totiž pro proměnnou modelující hodnotu minimální poměrné rezervy byl zvolen definiční obor - množina celých nezáporných čísel, mohlo by dojít ke zbytečnému zhoršení kvality získaného řešení. To se dá demonstrovat pomocí jednoduchého příkladu. Uvažujme situaci, kdy při volbě definičního oboru - množiny nezáporných čísel, vyjde po maximalizaci hodnota minimální poměrné rezervy 2,99. Při volbě definičního oboru - množiny celých nezáporných čísel by hodnota účelové funkce v případě optimálního řešení byla pouze 2,0 (následující vyšší hodnota, kterou je hodnota 3,0 již není dosažitelná). Je tedy patrné, že když dojde k volbě definičního oboru - množiny celých nezáporných čísel, může dojít k situaci, že bude získáno výrazně horší řešení než řešení při volbě definičního oboru - množiny nezáporných čísel.

Definiční obor - množina hodnot 0 a 1 nepřichází z principiálních důvodů ani u jedné z proměnných v úvahu.

V matematickém modelu pro návrh signálního plánu světelně řízené křižovatky musí být soustavou omezujících podmínek naformulována tři základní typy omezení:

- nabízena doba zelené nesmí být menší než je minimální doba požadovaná normou TP 81,
- nabízená doba zelené musí být dostatečná, tzn., musí zohledňovat intenzity vozidel za cyklus, doby potřebné pro vstup jednotkového vozidla do křižovatky a hodnoty minimálních poměrných rezerv pro jednotlivé proudy (minimální poměrná rezerva může být stejná pro všechny proudy),
- musí být dodrženy stanovené mezičasy vyplývající ze zvoleného pořadí fází (tj. jak ve fázových přechodech uvnitř cyklu, tak i pro fázový přechod přecházející přes hranici cyklu),
- konce dob zelených nastanou nejpozději na konci cyklu.

Původní model navržený řešitelským kolektivem prof. Černého má tvar (varianta minimalizující délku cyklu):

$$\min f(c) = c \quad (3.1)$$

za podmínek:

$$y_i - x_i \geq t_i \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.2)$$

$$y_i - x_i \geq \frac{\tau_i \cdot q_i \cdot c \cdot u}{3600} \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.3)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} \quad \text{pro } P_i \in F_i, P_j \in F_j \text{ je-li } m_{ij} > 0 \quad (3.4)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} - c \quad \text{pro } P_i \in F_i, P_j \in F_j \text{ je-li } m_{ij} > 0 \quad (3.5)$$

$$y_i \leq c \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.7)$$

$$y_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.8)$$

$$c \geq 0 \quad (3.9)$$

Funkce (3.1) reprezentuje optimalizační kritérium. Skupina omezujících podmínek (3.2) má za úkol zajistit, aby nabízená doba zelené za cyklus pro jednotlivé proudy neklesla pod hodnotu minimální doby zelené, která je za cyklus požadována. Počet omezujících podmínek ve skupině (3.2) odpovídá počtu proudů vstupujících do křižovatky. Skupina omezujících podmínek (3.3) má zajistit, aby nabízená doba zelené za cyklus pro jednotlivé proudy byla minimálně rovna požadované době zelené za cyklus. Počet omezujících podmínek ve skupině (3.3) odpovídá počtu proudů vstupujících do křižovatky. Skupina omezujících podmínek (3.4) má zajistit, že odstupy mezi konci zelených a začátky zelených v případě dvojic kolizních proudů uvnitř cyklu nebudou menší, než požadované hodnoty mezičasů. Skupina omezujících podmínek (3.5) má zajistit, že odstupy mezi konci dob zelených a začátky dob zelených kolizních proudů v případě fázového přechodu

na hranici cyklu nesmí klesnout pod požadované hodnoty mezičasů. Počty omezujících podmínek ve skupinách (3.4) a (3.5) odpovídají počtu kolizních situací, které se vyskytnou v jednotlivých fázových přechodech, vyplývajících z navrženého pořadí fází. Skupina omezujících podmínek (3.6) má zajistit že konce dob zelených nastanou nejpozději na konci cyklu. Počet omezujících podmínek ve skupině (3.6) odpovídá počtu proudů vstupujících do křižovatky. Skupiny omezujících podmínek (3.7) - (3.9) jsou skupinami obligatorních podmínek, tzn. podmínek vymezujících definiční obory proměnných. Počet omezujících podmínek ve skupině (3.7) odpovídá počtu proudů vstupujících do křižovatky, počet omezujících podmínek ve skupině (3.8) odpovídá počtu proudů vstupujících do křižovatky a skupinu (3.9) tvoří pouze jedna podmínka.

Původní model navržený řešitelským kolektivem prof. Černého má ve druhé variantě, ve které se maximalizuje minimální poměrná rezerva, tvar:

$$\min f(u) = u \quad (3.10)$$

za podmínek:

$$y_i - x_i \geq t_i \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.11)$$

$$y_i - x_i \geq \frac{\tau_i \cdot q_i \cdot c \cdot u}{3600} \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.12)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} \quad \text{pro } P_i \in F_i, P_j \in F_j \text{ je-li } m_{ij} > 0 \quad (3.13)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} - c \quad \text{pro } P_i \in F_i, P_j \in F_j \text{ je-li } m_{ij} > 0 \quad (3.14)$$

$$y_i \leq c \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.15)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.16)$$

$$y_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, p \quad (3.17)$$

$$u \geq 0 \quad (3.18)$$

Funkce (3.10) reprezentuje optimalizační kritérium. Význam jednotlivých skupin omezujících podmínek (3.11) - (3.17) je stejný jako u podmínek (3.2) - (3.9) uvedených u předchozího modelu. Soustava omezujících podmínek se liší pouze v jediné obligatorní podmínce, konkrétně se jedná o podmínku (3.18).

V úvodním komentáři podkapitoly 3.2 byla vyjmenována omezení, která musí být při řešení akceptována, tzn., že v modelu musí být ošetřena soustavou omezujících podmínek. Jedním z velice důležitých omezení je požadavek na zachování mezičasů v jednotlivých přechodech, které vyplynou ze zvoleného pořadí fází. Na základě uvedeného požadavku se tedy mezičasové podmínky vytvářejí pro dvojice kolizních proudů vstupujících do křižovatky v sousedních fázích. Existují však výjimky, což lze demonstrovat např. následujícím příkladem. Jsou dány tři proudy P_1 , P_2 a P_3 . Všechny uvedené proudy jsou vůči sobě kolizní, tzn., že řízení křižovatky bude třífázové. V takovýchto jednoduchých případech lze pochopitelně vynechat fázi sestavení množiny fázových skupin pomocí grafu bezkoliznosti a fázi výběru minimálního počtu fázových skupin. Je totiž na první pohled evidentní, že v každé z fázových skupin bude do křižovatky vstupovat právě jeden proud. Např., necht' ve fázi F1 bude vstupovat do křižovatky proud P_1 , ve fázi F2 potom P_2 a nakonec ve fázi F3 proud P_3 . Předpokládejme dále, že pro navržený signální plán bylo zvoleno pořadí fází F1-F2-F3.

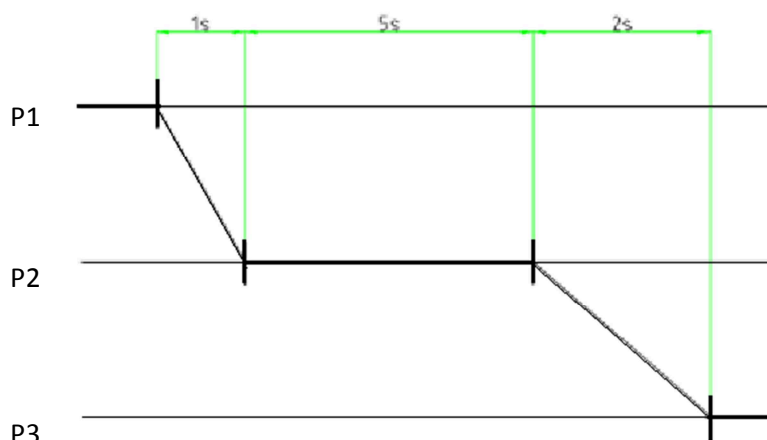
Dále předpokládejme, že pro uvedené tři proudy je definována následující symetrická matice mezičasů, viz tab. 3.1.

Tab. 3.1

	P1	P2	P3
P1	0	1	12
P2	1	0	2
P3	12	2	0

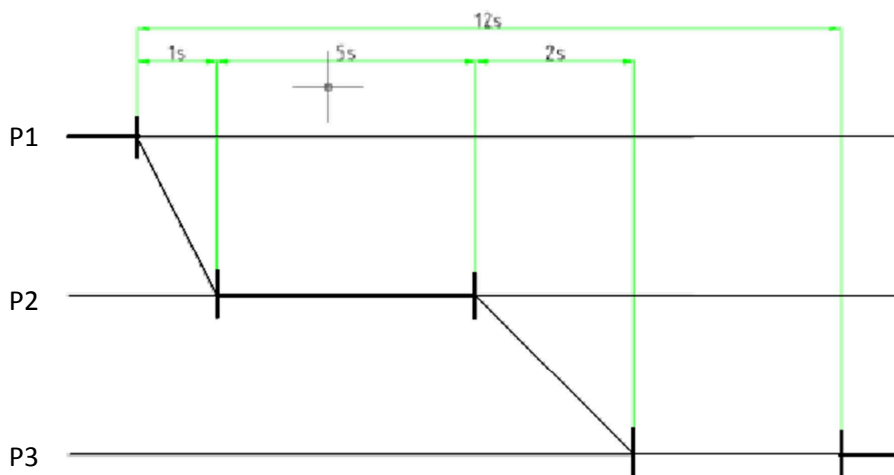
Dále předpokládejme, že proud P_2 je zatížen tak nízkou intenzitou, že splnění požadavku na nabízenou dobu zelené je možno provést prostřednictvím minimální doby zelené, tj. 5s. Pokud by do matematického modelu byly zahrnuty pouze mezičasové podmínky vztahující se k dvojicím po sobě jdoucích kolizních proudů, mohlo by se stát (a v případě varianty, ve které se minimalizuje délka cyklu by se patrně i stalo), že časový odstup mezi koncem doby zelené pro proud P_1 a začátkem doby zelené pro proud P_3 by byl pouze

8s, přičemž mezičas definovaný tabulkou činí 12s. Situaci vyplývající ze zvoleného pořadí fází je možno dokumentovat obr. č. 3.1, kde je schematicky znázorněn signální plán světelného řízení (nesprávně sestavený signální plán).



Obr. č. 3.1 : Schéma nesprávně sestaveného signálního plánu

Aby bylo možno dodržet požadavek na hodnotu tohoto mezcasu, je třeba do modelu zapracovat doplňkovou omezující podmínku, která dodržení uvedeného mezcasu zajistí. Správně sestavený signální plán je znázorněn na obr. č. 3.2



Obr. č. 3.2 : Schéma správně sestaveného signálního plánu

Obecně je tedy možno konstatovat, že hrozí-li vznik podobné situace, je třeba zkoumat, zda není nezbytné zapracovat do modelu i další mezcasy, než jen ty, které vyplývají ze stanoveného pořadí fází.

Před sestavou výše uvedených modelů je však zapotřebí vykonat určité přípravné etapy, viz podkapitola 3.3

3.3 Přípravné etapy před sestavou matematických modelů pro návrh světelného řízení

Přípravná etapa obsahuje realizaci tří kroků:

1. vytvoření množiny fází,
2. výběr minimálního počtu fází,
3. sestavení optimálního pořadí fází.

Ad 1) Vytvoření množiny fází

Je prvním krokem přípravné etapy. Fáze je množina proudů, které mohou vstupovat do křižovatky současně. Nejpoužívanějším způsobem k vyhledání minimálního počtu fází, je hledání maximálních kompletních podgrafů (tzv. klik grafu) v grafu bezkoliznosti. V grafu bezkoliznosti představují vrcholy jednotlivé proudy vstupující do křižovatky a hrany reprezentují vztah bezkoliznosti. Jsou-li dva proudy nekolizní nebo podmíněně kolizní, jsou odpovídající vrcholy v grafu bezkoliznosti spojeny hranou. Kompletním grafem je takový graf, kde jsou všechny hrany vzájemně propojeny. Požadavek na kompletnost grafu zajišťuje, že do křižovatky nebudou současně vstupovat kolizní proudy. Požadavek na maximální podgraf zajistí, že do křižovatky budou současně vstupovat všechny proudy, které mohou.

Kromě přístupu založeného na grafu bezkoliznosti existují ještě další přístupy, podrobnosti k těmto variantním přístupům lze nalézt v článku [10].

Ad 2) Výběr minimálního počtu fází

Dalším krokem v přípravné etapě je vyhledání minimálního počtu fází. Minimalizace počtu fází přispívá k zjednodušení způsobu řízení křižovatky. Při minimalizaci počtu fází je třeba respektovat, aby každý proud byl obsažen alespoň v jedné vybrané fázi. Pokud by nebyl splněn uvedený předpoklad, nebyl by umožněn danému proudu vstup do křižovatky. Minimalizaci počtu fází lze provést také více postupy, často se používá heuristická metoda popsaná [1] nebo přístup založený na matematickém programování [4]. V předložené bakalářské práci bude vybrán druhý z uvedených přístupů, tj. přístup založený na matematickém programování. Proměnné v modelu modelují rozhodnutí o výběru jednotlivých fází do výsledného fázového schématu. Protože výběr fází realizujeme pomocí rozhodnutí ANO-NE, volí se pro rozhodovací proměnné definiční obor 0 a 1. Proměnné

ponesou označení Z_j . Význam hodnot proměnných bude následující, když bude po vyřešení modelu platit, že $Z_j = 0$, fáze F_j nebude vybrána do výsledného fázového schématu, když bude po vyřešení modelu platit $Z_j = 1$, fáze F_j bude vybrána do výsledného fázového schématu.

Vstupní údaji do modelu jsou množina proudů I a množina fází J s uvedením, které proudy do jednotlivých fází patří.

Matematický model může mít dvě základní varianty. V první variantě vstupuje do úlohy množina proudů I , přičemž pro každý proud I je definována množina fází, která jej obsahuje, tato množina bude označena jako J_i . Základní varianta modelu pro výběr minimálního počtu fází bude mít potom tvar:

$$\min f(Z) = \sum_{j \in J} Z_j \quad (3.19)$$

za podmínek:

$$\sum_{j \in J} Z_j \geq 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (3.20)$$

$$Z_j \in \{0,1\} \quad \text{pro } j \in J \quad (3.21)$$

Funkce (3.19) reprezentuje optimalizační kritérium. Skupina omezujících podmínek (3.20) má za úkol zajistit, aby každý proud byl obsažen alespoň v jedné vybrané fázi. Počet omezujících podmínek ve skupině (3.20) odpovídá počtu proudů vstupujících do křižovatky. Skupina omezujících podmínek (3.21) definuje obligatorní podmínky. Počet podmínek v této skupině odpovídá počtu fází.

V některých publikacích se ke vstupním údajům řadí také tzv. proudově-fázová incidenční matice, označená např. A . Prvky této matice jsou tvořeny hodnotami 0 a 1. Pokud $a_{ij} = 1$, je proud $i \in I$ je zařazen do fáze $j \in J$, pokud $a_{ij} = 0$, znamená to opak, tj. proud $i \in I$ není zařazen do fáze $j \in J$.

Ve druhém případě má model pro výběr fází následující tvar:

$$\min f(z) = \sum_{j \in J} Z_j \quad (3.22)$$

za podmínek:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} \cdot Z_j \geq 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (3.23)$$

$$Z_j \in \{0,1\} \quad \text{pro } j \in J \quad (3.24)$$

Význam jednotlivých funkčních zápisů (3.22) a zápisů podmínek (3.23) a (3.24) je totožný jako v případě matematického modelu (3.19) - (3.21).

Pro počítačové experimenty je výhodnější přístup využívající matici A, protože umožňuje snazší zápis textu programu.

Ad 3) Určení optimálního pořadí fází

Při určení optimálního pořadí fází se postupuje následovně:

- a) vytvoří se všechna možná pořadí fází,
- b) pro každé pořadí se určí součet rozhodujících mezičasnů,
- c) jako optimální pořadí se vybere to pořadí, pro které je součet rozhodujících mezičasnů minimální.

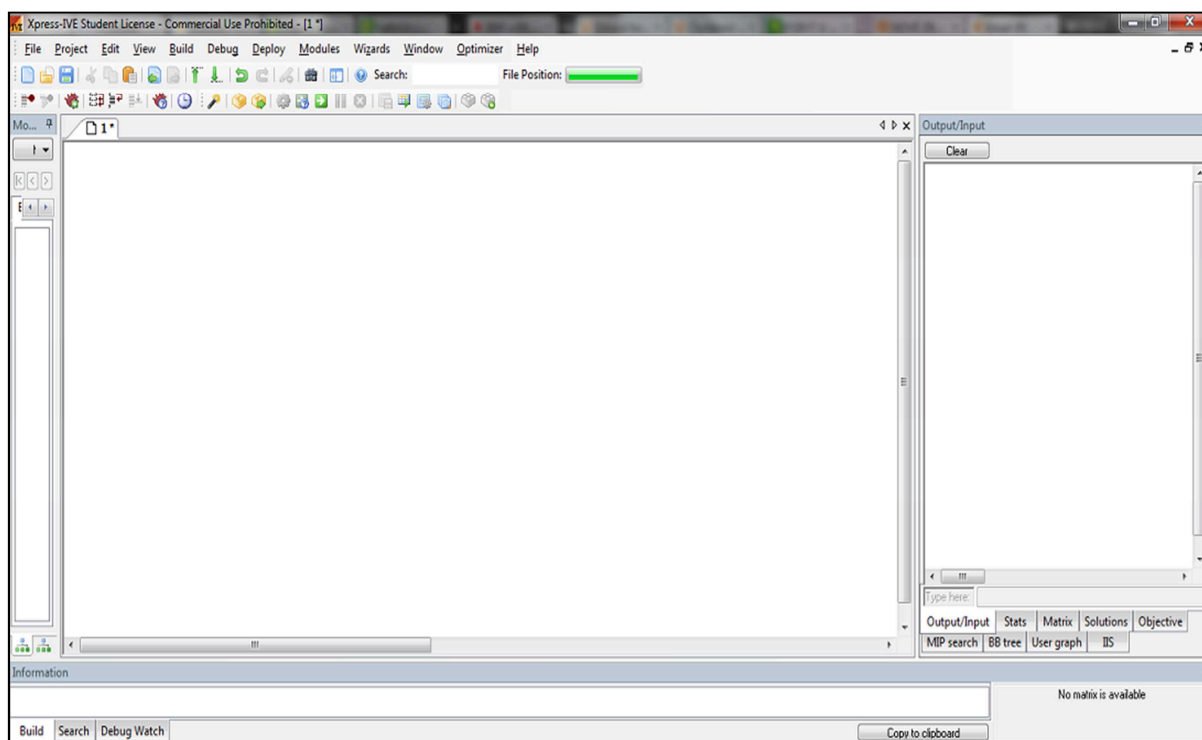
Pokud se některý proud vyskytne ve více vybraných fázích, musí tyto fáze bezprostředně následovat, (protože máme pro každý proud pouze jeden začátek a jeden konec) existují však i modely, které dokáží pracovat s více začátky a více konci pro stejný proud.

Při určování výsledného pořadí fází musí být určitým proudům vytvořeno takové pořadí, aby v křižovatce nedošlo k nahromadění vozidel a vzniku jejich zbytečného zdržení (negativní dopad na plynulost dopravy). Pořadí fází může být také ovlivněno sledem signálu volno pro chodce a cyklisty, aby mohli bezpečně a plynule přejít dělený přechod. Při určování pořadí fází, musí být brán ohled na požadavek, kdy je žádoucí signální plán řešené křižovatky zkoordinovat se signálním plánem jiné křižovatky anebo když je třeba při řízení vstupů proudů preferovat městskou hromadnou dopravu, či jiná specifika vyplývající z řešené křižovatky.

3.4 Řešení sestavených modelů

Řešení sestavených modelů lze provést v celé řadě optimalizačních software, které jsou v současné době k dispozici. V předložené práci bude k řešení modelů použit optimalizační software Xpress - IVE. Jedná se o software, jehož demoverze je pro akademické účely volně dostupná a pro transformaci navržených modelů do textu programu, na základě kterého řešení probíhá, existují poměrně jednoduché zásady.

Software Xpress - IVE byl vyvinut společností FICO v USA. Jak již bylo uvedeno, aby bylo vůbec možné řešit úlohu v tomto softwaru, musí být sestavené lineární matematické modely přepsány do tvaru se kterým umí daný software komunikovat. Matematický model, je nutno přepsat do jazyku MOSEL, se kterým Optimalizační software Xpress - IVE pracuje. Ukázku pracovního prostředí optimalizačního softwaru Xpress - IVE lze vidět na obr. č. 3.3.



Obr. č. 3.3 : Ukázka pracovního prostředí Xpress - IVE

V textu programu, na základě kterého řešení probíhá, musí být zachován určitý řád. Postup transformace modelu do textu programu bude uveden na konkrétním příkladě, bude se jednat o výše uvedenou úlohu o výběru minimálního počtu fází - bude se jednat o druhou variantu modelu využívající proudově - fázovou incidenční matici A.

Na začátku každého textu programu musí být uvedeno klíčové slovo *model*. Ve stejném řádku se doplní název textu programu, který si tvůrce volí podle svého uvážení. V našem případě je tedy možno napsat *VYBER_FAZI*. V druhém řádku se nachází klíčové slovo *uses* "*mmxprs*". Dále se do textu programu zařadí tzv. deklarační část, kterou do programu zapíšeme pod názvem *declarations*. Pod tímto klíčovým slovem budou nejdříve uvedeny množiny, které se v úloze vyskytují, v případě úlohy o výběru minimálního počtu fází přicházejí v úvahu dvě množiny – množina proudů a množina fází. Necht' do křížovky vstupuje 16 proudů v 5 fázích. Množina proudů vstupujících do křížovky se do software zapíše způsobem:

$$index_proudu=1..16$$

Analogicky se nadefinuje množina fází:

$$index_fáze=1..5$$

Dále v deklarační se identifikují všechny konstanty typu pole (array) a proměnné, které se úloze objevují (každá veličina, která má v modelu index, je veličina typu pole). Veličinám typu pole se kromě rozsahu přiřadí označení, buď *of real*, to znamená, že se jedná o reálnou konstantu nebo označení *of mpvar*, které vyjadřuje, že jde o proměnnou. Deklarační část se ukončí slovem *end-declarations*. V úloze o vyhledání minimálního počtu fází je zavedena jedna konstanta typu pole a jedna proměnná typu pole. Konstantami typu pole jsou prvky proudově fázově - incidenční matice, proměnné modelující rozhodnutí o výběru fází jsou také typu pole. Konstantu a_{ij} deklarujeme následovně:

$$a:array (index_proudu, index_fáze) of real$$

Proměnnou z_j deklarujeme následovně:

$$z:array (index_fáze) of mpvar$$

Po ukončení deklarační části klíčovým slovem *end-model* zavedeme hodnoty jednotlivých konstant. Konkrétní hodnoty konstanty typu pole se do software zapisuje způsobem:

$$označení\ konstanty::[]$$

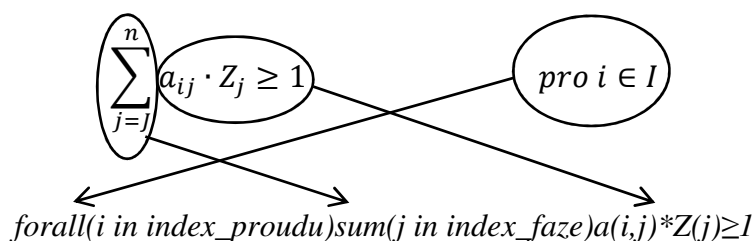
konstanta, která není typu pole, se do software zapisuje způsobem:

označení konstanty:=hodnota konstanty

V softwaru poté pokračujeme vypsáním omezujících podmínek. Pokud existuje v modelu více podmínek stejného typu, používá se k zápisu této skupiny podmínek příkaz cyklu. V matematickém modelu o výběru fází se vyskytuje následující skupina strukturálních podmínek.

$$\sum_{j \in J} a_{ij} \cdot Z_j \geq 1 \quad \text{pro } i \in I$$

V textu programu se uvedená skupina podmínek zapisuje následovně:



Pokud je zapotřebí, aby proměnné nabývaly celočíselných nezáporných hodnot, musí být soustava omezujících podmínek doplněna o podmínku, která uvedený požadavek zajistí. Zajištění požadavku se provede pomocí klíčového slova *is_integer*. V řešené úloze však nevystupují nezáporné celočíselné ale bivalentní proměnné. Příkaz, který zajišťuje, aby proměnné Z_j nabývaly hodnot 0 a 1 se zapíše způsobem:

forall(i in index_faze)Z(j) is_binary.

Je-li proměnná nezáporná, nepoužívá se žádný speciální příkaz, optimalizační software má nezápornost proměnných přímo předdefinovanu.

Do optimalizačního softwaru Xpress - IVE se dále musí zavést účelová funkce, jejíž hodnotu chceme optimalizovat, tím se myslí buď maximalizovat, nebo minimalizovat. Název účelové funkce je možno volit libovolně, je však vhodné aby vyjadřovala podstatu optimalizované veličiny, která se většinou odvozuje od typu úlohy, kterou řešíme. V řešené

úloze se jedná o veličinu - počet vybraných fází. Proto může text programu obsahovat např. následující zápis:

$$pocet_vybranych_fazi := \sum(j \text{ in } index_faze) Z(j)$$

Za účelovou funkcí se dále doplní příkaz k provedení extremalizace (minimalizace, maximalizace) hodnoty účelové funkce. Je-li zapotřebí hodnotu účelové funkce minimalizovat, doplní se příkaz *minimize* (zvolený název účelové funkce), je-li zapotřebí hodnotu účelové funkce maximalizovat, doplní se příkaz *maximize* (zvolený název účelové funkce). V případě řešené úlohy se bude jednat o minimalizaci počtu vybraných fází, proto bude zápis v textu programu vypadat následovně:

$$minimize(pocet_vybranych_fazi)$$

Na závěr textu programu se zpravidla uvádějí požadavky na výpis hodnot výstupních veličin. Nejčastěji se jedná o požadavek na výpis hodnoty účelové funkce a hodnot proměnných modelujících jednotlivá rozhodnutí.

Výpis hodnoty účelové funkce se děje pomocí příkazu *getobjval*, výpis výsledných hodnot proměnných modelujících jednotlivá rozhodnutí se děje pomocí příkazu *getsol*.

Výpis hodnoty účelové funkce v případě řešené úlohy bude mít tvar:

$$writeln("minimální počet vybraných fází je: ", getobjval)$$

Výpis hodnot proměnných v případě řešené úlohy bude mít tvar:

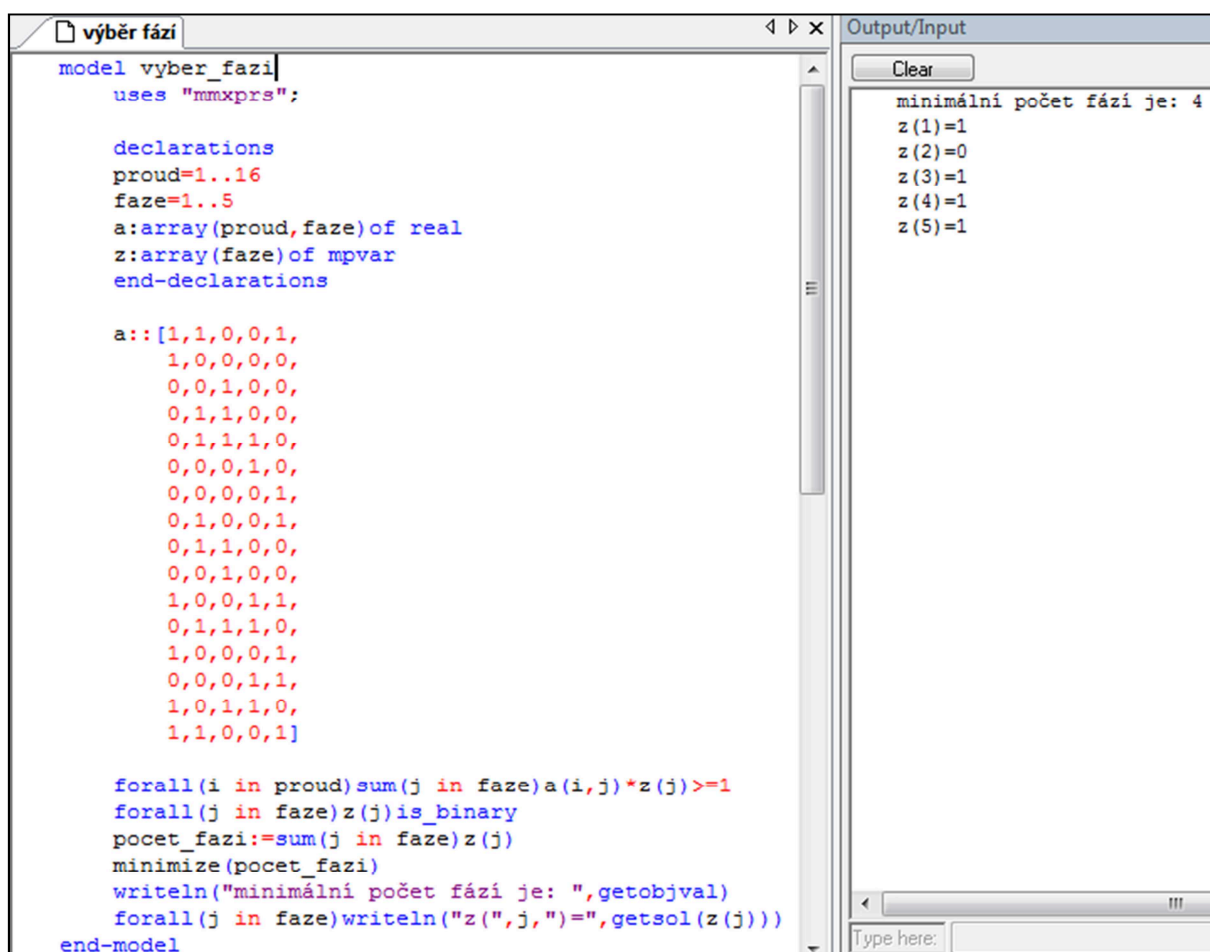
$$forall(j \text{ in } index_faze) writeln("Z(", j, ") = ", getsol(Z(j)))$$

Má-li řešitel požadavek, aby byly vypsány pouze kladné hodnoty (v řešené úloze pouze odpovídající vybraným fázím), učiní do textu programu zápis:

$$forall(j \text{ in } index_faze | getsol(Z(j)) > 0) writeln("Z(", j, ") = ", getsol(Z(j)))$$

Konec textu programu se deklaruje klíčovým slovem *end-model*

Pro přehlednost lze vypsát celý text programu, který bude mít tvar, viz. obr. č. 3.4



The screenshot shows a GAMS software window titled "výběr fází". The main editor displays a GAMS model named "vyber_fazi". The model uses the "mmps" solver and declares two sets: "proud" with 16 elements and "faze" with 5 elements. It defines a binary array "a" of size 16x5. The model's objective is to minimize the number of phases ("pocet_fazi"), which is the sum of the elements in the "z" array. Constraints require that for each "proud" element, the sum of selected phases is at least 1. The output window on the right shows the results: the minimum number of phases is 4, and the selected phases are 1, 3, 4, and 5.

```
model vyber_fazi
  uses "mmps";

  declarations
    proud=1..16
    faze=1..5
    a:array(proud,faze) of real
    z:array(faze) of mpvar
  end-declarations

  a::[1,1,0,0,1,
      1,0,0,0,0,
      0,0,1,0,0,
      0,1,1,0,0,
      0,1,1,1,0,
      0,0,0,1,0,
      0,0,0,0,1,
      0,1,0,0,1,
      0,1,1,0,0,
      0,0,1,0,0,
      1,0,0,1,1,
      0,1,1,1,0,
      1,0,0,0,1,
      0,0,0,1,1,
      1,0,1,1,0,
      1,1,0,0,1]

  forall(i in proud) sum(j in faze) a(i,j)*z(j)>=1
  forall(j in faze) z(j) is_binary
  pocet_fazi:=sum(j in faze) z(j)
  minimize(pocet_fazi)
  writeln("minimální počet fází je: ",getobjval)
  forall(j in faze) writeln("z(",j,")=",getsol(z(j)))
end-model
```

Output/Input

Clear

minimální počet fází je: 4
z(1)=1
z(2)=0
z(3)=1
z(4)=1
z(5)=1

Type here:

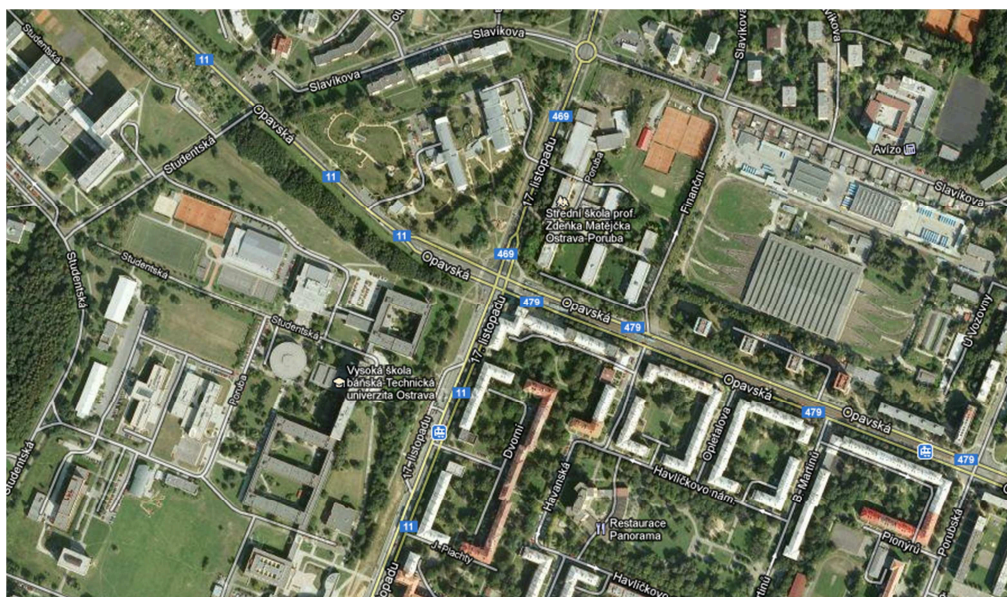
Obr. č. 3.4 : Text programu pro výběr minimálního počtu fází

4 IMPLEMENTACE MATEMATICKÉHO MODELU DO PODMÍNEK KONKRÉTNÍ KŘÍŽOVATKY

Teoretické postupy popsané v kapitolách 2 a 3 budou v kapitole 4 aplikovány na konkrétní křižovatku, na které se v současné době vyskytují závažné komplikace z hlediska řízení provozu.

4.1 Výběr řešené křižovatky

Řešená křižovatka se nachází ve městě Ostrava, v městské části Poruba. Z hlediska stavebního se jedná o úroňovou, průsečnou čtyřramennou křižovatku, do které ústí ulice Opavská a ulice 17. listopadu. Na obr. č. 4.1 je letecký snímek lokality, ve které se uvedená křižovatka nachází.



Obr. č. 4.1 : Letecký snímek řešené křižovatky

Jedná se o křižovatku ležící na hlavním tahu spojujícím Opavu s centrem Ostravy a obchvatem města, tvořeným ulicí Rudnou, která dále pokračuje směrem na města Havířov, Karviná, Orlová a Český Těšín. Řešenou křižovatku dále využívají řidiči, kteří se potřebují dostat na nově zbudovanou dálnici D1 (původně dálnice D47) za účelem jízdy ve směru na Bohumín a Polsko a dále ve směrech na Přerov, Olomouc a Brno. Už z této základní charakteristiky je patrné, že se jedná o dopravně velice významnou a tedy i silně zatíženou křižovatku.

Kromě běžných účastníků silničního provozu, který mi jsou chodci a vozidla individuální automobilové dopravy, je řešená křižovatka dále využívána městskou hromadnou dopravou, konkrétně se jedná o tramvajovou dopravu a příměstskou autobusovou dopravou.

Problémy se vyskytují zejména v dobách dopravních špiček a projevují se vznikem kolon před křižovatkou v nejvíce zatížených směrech. Problémy v dopravních špičkách se vyskytují v průběhu celého pracovního týdne, jedny z nejkritičtějších situací se však vyskytují v průběhu pátečních odpoledních dopravních špiček, tj. mezi 14 a 16 hodinou. Vysoké zatížení křižovatky v páteční odpolední dopravní špičce je možno vidět na obr. č. 4.2 a 4.3



Obr. č 4.2 : Příklad zatížení křižovatky



Obr. č 4.3 : Příklad zatížení křižovatky

Do řešené křižovatky vstupuje celkem 21 proudů, z nichž je 12 vozidlových 2 tramvajové a 7 chodeckých. Některé proudy se však řídí společným světelným návěstidlem nebo mohou být považovány za jediný proud. Pro potřeby optimalizace je tedy možné provést redukci počtu proudů. Po redukci bylo získáno 8 vozidlových proudů, 1 tramvajový proud a 7 chodeckých proudů, pro potřeby optimalizačního výpočtu tedy bude uvažováno s 16-ti proudy.

4.2 Vstupní údaje do optimalizačního výpočtu

Kromě vstupní množiny proudů je třeba k řešení úlohy opatřit všechny vstupní údaje, které matematický model uvedený v kapitole 3 pro řešení vyžaduje. Připomeňme, že ke vstupním údajům patří:

- intenzity účastníků vstupujících do křižovatky v jednotlivých proudech,
- matice mezičasů,
- doby potřebné pro vstup vozidla do křižovatky v saturovaných proudech z jednotlivých směrů,
- délka cyklu ve variantě, kde se maximalizuje minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené za cyklus,
- hodnota minimální poměrné rezervy ve variantě, ve které minimalizuje délka cyklu,
- další specifické údaje potřebné k vytvoření signálního plánu.

4.2.1 Intenzity účastníků vstupujících do křižovatky v jednotlivých proudech

Intenzity účastníků vstupujících do křižovatky v jednotlivých proudech byly získány měřením. Měření probíhalo v dobách pátečních odpoledních dopravních špiček pomocí videozáznamu, který obsahoval monitoring provozu v dané křižovatce. V rámci vyhodnocování získaných videozáznamů byly u vozidlových proudů sledovány jak počty vozidel vstupujících do křižovatky z jednotlivých směrů, tak i skladba dopravního proudu. Výsledkem měření byly intenzity účastníků vyjádřené v jednotkových vozidlech za hodinu. K přepočtu na jednotková vozidla byly použity následující přepočtové koeficienty, viz. tab. č. 4.1. [16]

Tab. č. 4.1

Dopravní prostředek	Typ křižovatky	Průměrné a stykové se SSZ	Průměrné a stykové bez SSZ	Okružní
Jízdní kola		0,5	0,5	0,5
Motocykl		0,8	0,8	0,8
Osobní vozidla*		1,0	1,0	1,0
Nákladní vozidla, autobusy**		1,7	1,5	2,0
Nákladní soupravy, kloubové autobusy		2,0	2,0	3,0

* ... včetně nákladních vozidel do 3,5 t celkové hmotnosti.

** ... nákladní vozidla nad 3,5 t celkové hmotnosti mimo nákladních souprav a autobusy mimo kloubové autobusy.

Jelikož se jedná o průměrnou křižovatku se zavedeným SSZ, použijí se přepočtové koeficienty uvedené v prvním sloupci tabulky.

V tab. č. 4.2 jsou uvedeny výsledné zaokrouhlené hodnoty hodinových intenzit přepočítané na jednotková vozidla podle jednotlivých proudů

Tab. č. 4.2

Proud	14 – 16 hod	Proud	14 – 16 hod
S _A	59	S _D	84
V _A	371	V _D	753
V _B	616l	V _E	602
V _C	130	V _F	92

4.2.2 Matice mezičasů

Matice mezičasů byla získána z Dopravně inženýrské kanceláře Ostravských komunikací a.s., které jsou správcem řešené křižovatky. Původní matice mezičasů byla redukována pouze na hodnoty týkající se proudů vstupujících do křižovatky po redukci zmíněné v závěru kapitoly 4.1. Matice mezičasů po redukci je uvedena na obr. č. 4.4.

x_j/y_i	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆
P ₁		-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₂	-		-	-	-	-	7	5	-	-	-	-	-	-9	-	-
P ₃	5	5		-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	9
P ₄	-	6	-		-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-
P ₅	-	2	-	-		-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-
P ₆	-	-	8	5	-		-	-	5	9	-	-	-	-	-	-
P ₇	-	-	-	-	4	4		-	-	-	-	9	-	-	4	-
P ₈	-	-	-	-	-	5	-		-	-	-	-	-	-	4	-
P ₉	-	8	-	-	-	-	-	-		-	16	-	17	-	-	-
P ₁₀	13	13	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-
P ₁₁	-	-	15	12	-	-	-	-	17	-		-	-	-	-	-
P ₁₂	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
P ₁₃	-	-	-	-	14	14	-	-	-	-	-	-		-	-	-
P ₁₄	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-
P ₁₅	-	-	-	-	-	-	9	9	-	-	-	-	-	-		-
P ₁₆	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Obr. č. 4.4 : Matice mezičasů pro řešenou křižovatku

4.2.3 Doby potřebné pro vstup vozidel do křižovatky v saturovaných proudech

Za účelem získání uvedené kategorie vstupních dat je nejspolehlivějším způsobem opakované provádění dynamických měření v terénu. Pro potřeby optimalizačního výpočtu však bude pracováno pouze s odhady hodnot těchto veličin. Byly provedeny dva odhady - optimistický odhad, ve kterém je uvažováno s dobou potřebnou pro vstup do křižovatky 1s a pesimistický odhad ve kterém je uvažováno s hodnotou potřebnou pro vstup vozidla do křižovatky 2s.

4.2.4 Délka cyklu

Délka cyklu v řešeném období činí 100s, s touto hodnotou bude uvažováno v matematických modelech - konkrétně ve variantě, kdy se maximalizuje minimální poměrná rezerva mezi nabízenou dobou zelené a průměrně požadovanou dobou zelené pro proud. V druhé variantě modelu je hodnota délky cyklu proměnnou, proto není zahrnuta ve vstupních údajích.

4.2.5 Hodnota minimální poměrné rezervy

Hodnota minimální poměrné rezervy pro řešené období bude volena ve výši 1, s touto hodnotou bude uvažováno v matematických modelech - konkrétně ve variantě, kdy se minimalizuje délka cyklu. S hodnotou vyšší než 1 nebude uvažováno, protože se jedná o období se silným zatížením, kdy je požadováno, aby délka cyklu byla opravdu co nejkratší. V druhé variantě modelu je hodnota minimální poměrné rezervy proměnnou, proto není zahrnuta ve vstupních údajích.

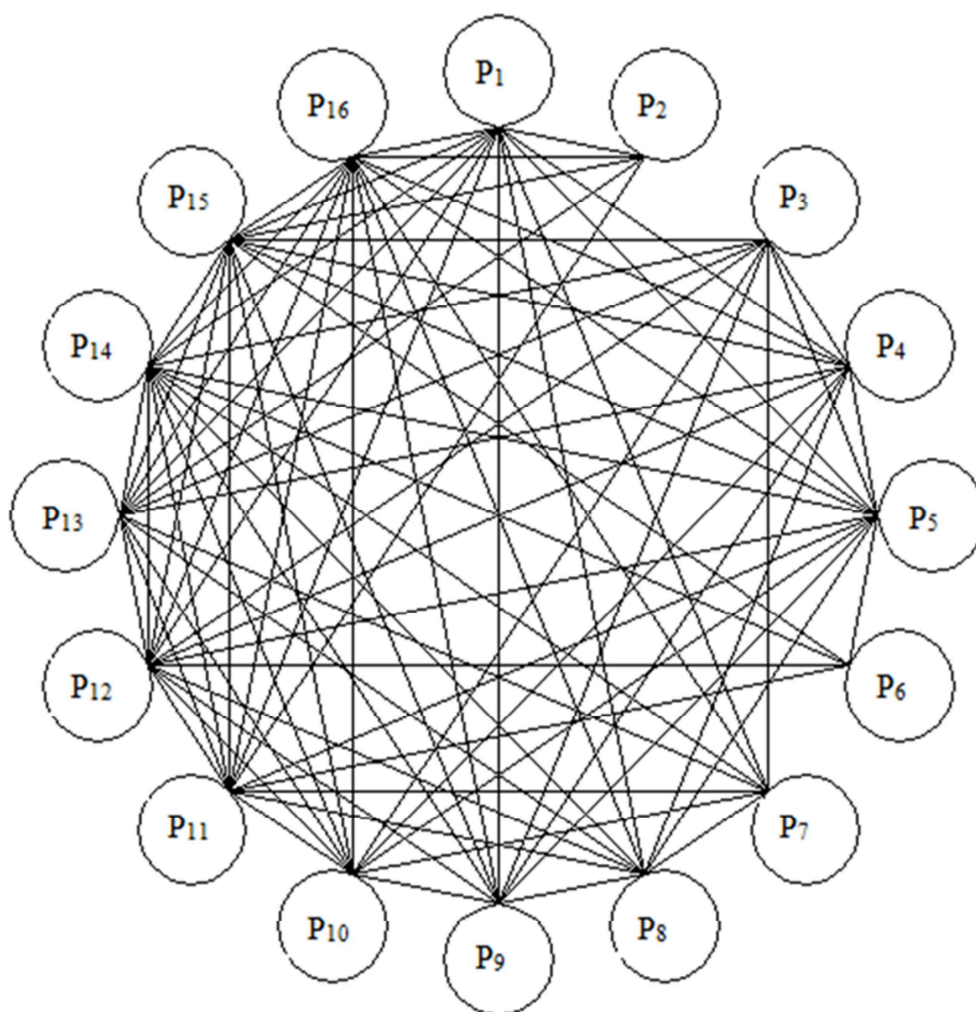
4.2.6 Další specifické údaje

V řešené křižovatce nejsou známy žádné další specifické údaje, které by bylo zapotřebí při tvorbě signálního plánu zohlednit.

4.3 Přípravná etapa optimalizačního výpočtu

Vytvoření množiny fází

Po vytvoření množiny proudů se vytváří graf bezkoliznosti. V grafu bezkoliznosti jsou proudy znázorněny vrcholy a nekolizní proudy anebo podmíněně kolizní proudy se spojují hranami. Za nekolizní proudy se považují ty proudy, mezi kterými neexistuje žádný bod střetu. Existují však výjimky, které jsou dané platnou legislativou (např. proudy odbočující doleva musí dát přednost přímému směru z protisměru nebo proudy odbočující doleva a doprava musí dát přednost současně přecházejícím chodcům). Graf bezkoliznosti bude mít 16 vrcholů. Graf bezkoliznosti pro řešenou křižovatku je znázorněn na obr. č. 4.5



Obr. č. 4.5 : Graf bezkoliznosti [Autor]

Po sestrojení grafu bezkoliznosti můžeme vytvářet fáze. Fáze bude odpovídat maximálnímu kompletnímu podgrafu tzv. (klika grafu). Požadavek na maximální podgraf zajistí, že do křižovatky budou vstupovat současně všechny proudy, které mohou. V prvním kroku se zvolí libovolná dvojice vrcholů, které však musí být spojeny hranou. V dalším kroku se k těmto vrcholům přidávají další vrcholy, které ovšem musí být propojeny se všemi dosud vybranými vrcholy. Vrcholy se však mohou vyskytovat ve více podgrafech (fázích) současně. V případě řešené křižovatky bylo získáno 5 fází.

$F_1 \{P_1, P_2, P_{11}, P_{13}, P_{15}, P_{16}\}$

$F_2 \{P_1, P_4, P_5, P_8, P_9, P_{12}, P_{16}\}$

$F_3 \{P_3, P_4, P_5, P_9, P_{10}, P_{12}, P_{15}\}$

$F_4 \{P_5, P_6, P_{11}, P_{12}, P_{14}, P_{15}\}$

$F_5 \{P_1, P_7, P_8, P_{11}, P_{13}, P_{14}, P_{16}\}$

V dalším postupu se minimalizuje počet fází obsahujících všechny proudy. Je třeba dbát na to, aby každému proudu byl umožněn vstup alespoň v jedné vybrané fázi.

Výběr minimálního počtu fází

Výběr fází byl proveden v optimalizačním softwaru Xpress - IVE. Výběr bude proveden s využitím modelu uvedeného v kapitole 3. Na základě uvedeného modelu byl sestaven text programu pro optimalizační software Xpress - IVE. Text programu již byl uveden obr. č. 3.4. Jak je z uvedeného obrázku patrné, byly do výsledného fázového schématu vybrány 4 fáze (nebyla zařazena fáze F_2).

V dalším kroku musíme určit pořadí, v jakém budou jednotlivé fáze do křižovatky vstupovat.

Určení optimálního pořadí fází

Při určování pořadí fází v izolované křižovatce je třeba respektovat důležitou zásadu, a to že, pokud se některý z proudů vyskytne ve více fázích najednou, potom tyto fáze musí být řazeny za sebou. Protože v řešené křižovatce nelze uspořádat fáze tak, aby bylo možno splnit uvedenou zásadu, bude zvolen náhradní postup. Vybere se libovolné z uvedených pořadí fází a pro zvolené pořadí fází dojde u proudů (proudů), který vstupuje do křižovatky v nesousedních fázích, pro potřeby optimalizačního výpočtu k jeho (jejich) rozdělení na takový počet fiktivních částí, který odpovídá počtu případů, kdy fáze obsahující daný proud spolu nesousedí. Celkový počet proudů vstupujících do křižovatky se tedy zvýší na 17.

Za účelem splnění uvedených předpokladů, bylo zvoleno uvedené pořadí fází F_1 - F_5 - F_4 - F_3 . Ve zvoleném pořadí fází nastává nepříjemná situace popsaná ve výše uvedeném odstavci, pouze v jednom případě to odpovídá situaci, kdy je např. požadováno, aby upravený matematický model přinesl co nejmenší náročnost na rozšíření, které přinese nejmenší komplikace v řešeném modelu.

Pro zvolené pořadí fází budou tedy pro jednotlivé fázové přechody v optimalizačních modelech uplatňovány následující dílčí tabulky mezičasu tab. č. 4.3 - tab. č. 4.6.

Tab. č. 4.3

$F_1 \rightarrow F_5$	P_1	P_7	P_8	P_{11}	P_{13}	P_{14}	P_{16}
P_1	-	-	-	-	-	-	-
P_2	-	7	5	-	-	9	-
P_{11}	-	-	-	-	-	-	-
P_{13}	-	-	-	-	-	-	-
$P_{17} (P_{15})$	-	9	9	-	-	-	-
P_{16}	-	-	-	-	-	-	-

Tab. č. 4.4

$F_5 \rightarrow F_4$	P_5	P_6	P_{11}	P_{12}	P_{14}	P_{15}
P_1	-	2	-	-	-	-
P_7	4	4	-	9	-	4
P_8	-	5	-	-	-	4
P_{11}	-	-	-	-	-	-
P_{13}	14	14	-	-	-	-
P_{14}	-	-	-	-	-	-
P_{16}	-	0	-	-	-	-

Tab. č. 4.5

$F_4 \rightarrow F_3$	P_3	P_4	P_5	P_9	P_{10}	P_{12}	P_{15}
P_5	-	-	-	-	-	-	-
P_6	8	5	-	5	9	-	-
P_{11}	15	12	-	17	-	-	-
P_{12}	-	-	-	-	-	-	-
P_{14}	-	3	-	-	-	-	-
P_{15}	-	-	-	-	-	-	-

Tab. č. 4.6

$F_3 \rightarrow F_1$	P_1	P_2	P_{11}	P_{13}	$P_{17} (P_{15})$	P_{16}
P_3	5	5	4	-	-	9
P_4	-	6	4	-	-	-
P_5	-	2	-	4	-	-
P_9	-	8	16	17	-	-
P_{10}	13	13	-	-	-	-
P_{12}	-	0	-	-	-	-
P_{15}	-	-	-	-	-	-

Mezičasy uvedené v dílčích tabulkách budou použity v navrženém modelu.

V tomto okamžiku jsou již k dispozici všechny potřebné údaje pro tvorbu matematického modelu a tedy i jeho řešení. Matematické modely v uvedené v následujících podkapitolách budou v některých podmínkách redukovány, tzn., nebudou obsahovat všechny podmínky v redukováných skupinách. V těchto redukováných skupinách budou uvedeny vždy pouze první a poslední podmínka.

4.4 Matematické modely - varianta maximalizace minimální poměrné rezervy

4.4.1 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s

$$\max f(u) = u$$

za podmínek:

$$y_1 - x_1 \geq t_i \Rightarrow y_1 - x_1 \geq 5$$

⋮

$$y_{17} - x_{17} \geq t_i \Rightarrow y_{17} - x_{17} \geq 5$$

$$y_1 - x_1 \geq \frac{1 \cdot 64 \cdot 100 \cdot u}{3600} \Rightarrow y_1 - x_1 \geq 1,77 \cdot u$$

⋮

$$y_{17} - x_{17} \geq \frac{1 \cdot 1 \cdot 100 \cdot u}{3600} \Rightarrow y_{17} - x_{17} \geq 0,0277 \cdot u$$

$$\begin{array}{llll}
x(7) - y(2) \geq 7 & x(6) - y(1) \geq 2 & x(3) - y(6) \geq 8 & x(1) - y(3) \geq 5 - 100 \\
x(8) - y(2) \geq 5 & x(5) - y(7) \geq 4 & x(4) - y(6) \geq 5 & x(2) - y(3) \geq 5 - 100 \\
x(14) - y(2) \geq 9 & x(6) - y(7) \geq 4 & x(9) - y(6) \geq 5 & x(11) - y(3) \geq 4 - 100 \\
x(7) - y(17) \geq 9 & x(12) - y(7) \geq 9 & x(10) - y(6) \geq 9 & x(16) - y(3) \geq 9 - 100 \\
x(8) - y(17) \geq 9 & x(15) - y(7) \geq 4 & x(3) - y(11) \geq 15 & x(2) - y(4) \geq 6 - 100 \\
& x(6) - y(8) \geq 5 & x(4) - y(11) \geq 12 & x(11) - y(4) \geq 4 - 100 \\
& x(15) - y(8) \geq 4 & x(9) - y(11) \geq 17 & x(2) - y(5) \geq 2 - 100 \\
& x(5) - y(13) \geq 14 & x(4) - y(14) \geq 3 & x(13) - y(5) \geq 4 - 100 \\
& x(6) - y(13) \geq 14 & & x(2) - y(9) \geq 8 - 100 \\
& x(6) - y(16) \geq 0 & & x(11) - y(9) \geq 16 - 100 \\
& & & x(13) - y(9) \geq 17 - 100 \\
& & & x(1) - y(10) \geq 13 - 100 \\
& & & x(2) - y(10) \geq 13 - 100 \\
& & & x(2) - y(12) \geq 0 - 100
\end{array}$$

$$y_i \leq 100 \quad \text{pro } i = 1, \dots, 17$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, 17$$

$$y_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, 17$$

$$u \geq 0$$

4.4.2 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s

Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s se bude od modelu uvedené v kapitole 4.4.1 lišit pouze v podmínkách, zajišťujících požadovanou dobu zelené upravenou o minimální poměrnou rezervu. Skupina odlišných podmínek bude mít tvar:

$$y_1 - x_1 \geq \frac{2 \cdot 64 \cdot 100 \cdot u}{3600} \Rightarrow y_1 - x_1 \geq 3,55 \cdot u$$

⋮

$$y_{17} - x_{17} \geq \frac{2 \cdot 1 \cdot 100 \cdot u}{3600} \Rightarrow y_{17} - x_{17} \geq 0,055 \cdot u$$

4.5 Sestavení matematického modelu - varianta minimalizace délky cyklu

4.5.1 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s

$$\min f(c)=c$$

za podmínek:

$$y_1 - x_1 \geq t_i \Rightarrow y_1 - x_1 \geq 5$$

⋮

$$y_{17} - x_{17} \geq t_i \Rightarrow y_{17} - x_{17} \geq 5$$

$$y_1 - x_1 \geq \frac{1 \cdot 64 \cdot c \cdot 1,1}{3600} \Rightarrow y_1 - x_1 \geq 0,01955 \cdot c$$

⋮

$$y_{17} - x_{17} \geq \frac{1 \cdot 1 \cdot c \cdot 1,1}{3600} \Rightarrow y_{17} - x_{17} \geq 0,0003055 \cdot c$$

$x(7) - y(2) \geq 7$	$x(6) - y(1) \geq 2$	$x(3) - y(6) \geq 8$	$x(1) - y(3) \geq 5 - c$
$x(8) - y(2) \geq 5$	$x(5) - y(7) \geq 4$	$x(4) - y(6) \geq 5$	$x(2) - y(3) \geq 5 - c$
$x(14) - y(2) \geq 9$	$x(6) - y(7) \geq 4$	$x(9) - y(6) \geq 5$	$x(11) - y(3) \geq 4 - c$
$x(7) - y(17) \geq 9$	$x(12) - y(7) \geq 9$	$x(10) - y(6) \geq 9$	$x(16) - y(3) \geq 9 - c$
$x(8) - y(17) \geq 9$	$x(15) - y(7) \geq 4$	$x(3) - y(11) \geq 15$	$x(2) - y(4) \geq 6 - c$
	$x(6) - y(8) \geq 5$	$x(4) - y(11) \geq 12$	$x(11) - y(4) \geq 4 - c$
	$x(15) - y(8) \geq 4$	$x(9) - y(11) \geq 17$	$x(2) - y(5) \geq 2 - c$
	$x(5) - y(13) \geq 14$	$x(4) - y(14) \geq 3$	$x(13) - y(5) \geq 4 - c$
	$x(6) - y(13) \geq 14$		$x(2) - y(9) \geq 8 - c$
	$x(6) - y(16) \geq 0$		$x(11) - y(9) \geq 16 - c$
			$x(13) - y(9) \geq 17 - c$
			$x(1) - y(10) \geq 13 - c$
			$x(2) - y(10) \geq 13 - c$
			$x(2) - y(12) \geq 0 - c$

$$y_i \leq c \quad \text{pro } i = 1, \dots, 17$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, 17$$

$$y_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, 17$$

$$c \geq 0$$

4.5.2 Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s

Matematický model při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s se bude od modelu uvedené v kapitole 4.5.1 lišit pouze v podmínkách, zajišťujících požadovanou dobu zelené ($u=1$). Skupina odlišných podmínek bude mít tvar:

$$y_1 - x_1 \geq \frac{2 \cdot 64 \cdot c \cdot 1,1}{3600} \Rightarrow y_i - x_i \geq 0,03911 \cdot c$$
$$\vdots$$
$$y_{17} - x_{17} \geq \frac{2 \cdot 1 \cdot c \cdot 1,1}{3600} \Rightarrow y_i - x_i \geq 0,000611 \cdot c$$

4.6 Texty programů - varianta maximalizace minimální poměrné rezervy

4.6.1 Text programu pro maximalizaci minimální poměrné rezervy při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s

```
model poradi1
  uses "mmxprs"
  declarations

  proud=1..17
  x:array(proud)of mpvar
  y:array(proud)of mpvar
  tau:array(proud)of real
  q:array(proud)of real
  t:array(proud)of real
  u:mpvar
end-declarations

tau::[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
q::[64,393,624,138,88,823,669,95,38,1,1,1,1,1,1,1,1]
t::[5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5]
c:=100

forall(i in proud)y(i)-x(i)>=t(i)
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tau(i)*q(i)*c*u/3600
forall(i in proud)y(i)<=c

x(7)-y(2)>=7      x(5)-y(7)>=4      x(3)-y(6)>=8      x(1)-y(3)>=5-c
x(8)-y(2)>=5      x(6)-y(7)>=4      x(4)-y(6)>=5      x(2)-y(3)>=5-c
x(14)-y(2)>=9     x(6)-y(7)>=4      x(9)-y(6)>=5      x(11)-y(3)>=4-c
x(7)-y(17)>=9     x(12)-y(7)>=9     x(10)-y(6)>=9     x(16)-y(3)>=9-c
x(8)-y(17)>=9     x(15)-y(7)>=4     x(3)-y(11)>=15    x(2)-y(4)>=6-c
                  x(6)-y(8)>=5      x(4)-y(11)>=12    x(11)-y(4)>=4-c
                  x(15)-y(8)>=4     x(9)-y(11)>=17    x(2)-y(5)>=2-c
                  x(5)-y(13)>=14    x(4)-y(14)>=3     x(13)-y(5)>=4-c
                  x(6)-y(13)>=14                    x(2)-y(9)>=8-c
                  x(6)-y(16)>=0                    x(11)-y(9)>=16-c
                                                  x(13)-y(9)>=17-c
                                                  x(1)-y(10)>=13-c
                                                  x(2)-y(10)>=13-c
                                                  x(2)-y(12)>=0-c

forall(i in proud)x(i)is_integer
forall(i in proud)y(i)is_integer

minimalni_pomerna_rezerva:=u
maximize(minimalni_pomerna_rezerva)

writeln("minimální poměrná rezerva je: ",getobjval)
writeln
writeln("začátky dob zelených pro jednotlivé proudy jsou:")
forall(i in proud)writeln("x(",i,")= ",getsol(x(i)))
writeln("konce dob zelených pro jednotlivé proudy jsou:")
forall(i in proud)writeln("y(",i,")= ",getsol(y(i)))
writeln("Hodnoty poměrných rezerv pro jednotlivé proudy jsou:")
forall(i in proud)writeln("Pro proud ",i," = ",getsol(3600*(y(i)-x(i))/(tau(i)*q(i)*c)))
end-model
```

Po ukončení optimalizačního výpočtu byly získány následující výsledky viz tab. č. 4.7

Tab. č. 4.7

Proud		začátky dob zelených		konce dob zelených	
P ₁		13		41	
P ₂		0		12	
P ₃		76		95	
P ₄		83		94	
P ₅		81		96	
P ₆		43		68	
P ₇		19		39	
P ₈		17		22	
P ₉		83		88	
P ₁₀		77		87	
P ₁₁		12		20	
P ₁₂		48		100	
P ₁₃		5		10	
P ₁₄		21		80	
P ₁₇	P ₁₅	0	81	5	100
P ₁₆		4		43	

Hodnota účelové funkce činila 1.07623

4.6.2 Text programu pro maximalizaci minimální poměrné rezervy při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s

Text programu pro maximalizaci minimální poměrné rezervy při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s je stejný jako v případě podkapitoly 4.6.1

Po ukončení optimalizačního výpočtu byly získány hodnotově stejné výsledky jako v případě textu programu uvedeného v podkapitole 4.6.1, rozdíl byl pouze v hodnotě účelové funkce, která činila 0.538

4.7 Texty programů varianta minimalizace délky cyklu

4.7.1 Text programu pro minimalizaci délky cyklu při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s

```
model poradil
  uses"mmxprs"
  declarations

    proud=1..17
    x:array(proud)of mpvar
    y:array(proud)of mpvar
    tau:array(proud)of real
    q:array(proud)of real
    t:array(proud)of real
    c:mpvar
  end-declarations

  tau::[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
  q::[64,393,624,138,88,823,669,95,72,1,1,1,1,1,1,1]
  t::[5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5]
  u:=1.1

  forall(i in proud)y(i)-x(i)>=t(i)
  forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tau(i)*q(i)*c*u/3600
  forall(i in proud)y(i)<=c

  x(7)-y(2)>=7      x(5)-y(7)>=4      x(3)-y(6)>=8      x(1)-y(3)>=5-c
  x(8)-y(2)>=5      x(6)-y(7)>=4      x(4)-y(6)>=5      x(2)-y(3)>=5-c
  x(14)-y(2)>=9     x(6)-y(7)>=4      x(9)-y(6)>=5      x(11)-y(3)>=4-c
  x(7)-y(17)>=9     x(12)-y(7)>=9     x(10)-y(6)>=9     x(16)-y(3)>=9-c
  x(8)-y(17)>=9     x(15)-y(7)>=4     x(3)-y(11)>=15    x(2)-y(4)>=6-c
                  x(6)-y(8)>=5     x(4)-y(11)>=12    x(11)-y(4)>=4-c
                  x(15)-y(8)>=4     x(9)-y(11)>=17    x(2)-y(5)>=2-c
                  x(5)-y(13)>=14    x(4)-y(14)>=3     x(13)-y(5)>=4-c
                  x(6)-y(13)>=14    x(2)-y(9)>=8-c
                  x(6)-y(16)>=0     x(11)-y(9)>=16-c
                                      x(13)-y(9)>=17-c
                                      x(1)-y(10)>=13-c
                                      x(2)-y(10)>=13-c
                                      x(2)-y(12)>=0-c

  forall(i in proud)x(i)is_integer
  forall(i in proud)y(i)is_integer

  delka_cyklu:=c
  minimize(delka_cyklu)

  writeln("minimální délka cyklu je: ",getobjval," s")
  writeln
  writeln("začátky dob zelených pro jednotlivé proudy jsou:")
  forall(i in proud)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))
  writeln("konce dob zelených pro jednotlivé proudy jsou:")
  forall(i in proud)writeln("y(",i,")=",getsol(y(i)))
end-model
```

Po ukončení optimalizačního výpočtu byly získány následující výsledky viz tab. č. 4.8

Tab. č. 4.8

Proud		začátky dob zelených		konce dob zelených	
P ₁		0		36	
P ₂		0		13	
P ₃		81		102	
P ₄		78		83	
P ₅		46		79	
P ₆		46		73	
P ₇		20		42	
P ₈		18		33	
P ₉		78		83	
P ₁₀		82		87	
P ₁₁		0		47	
P ₁₂		51		83	
P ₁₃		0		24	
P ₁₄		22		61	
P ₁₇	P ₁₅	0	46	6	83
P ₁₆		4		38	

Délka cyklu činila 107s.

4.7.2 Text programu pro minimalizaci délky cyklu při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s

Text programu pro minimalizaci délky cyklu při hodnotě doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 2s je stejný jako v případě podkapitoly 4.7.1

Po ukončení optimalizačního výpočtu nebyly získány výsledky, protože množina přípustných řešení je při této variantě modelu prázdná.

5 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Podle navrženého schématu experimentů uvedeného v podkapitolách 4.4 - 4.7, bylo nejdříve přistoupeno k realizaci výpočetních experimentů týkajících se maximalizace minimální poměrné rezervy pro hodnotu doby vstupu vozidla v saturovaném proudu 1s. Řešením programu uvedeného v podkapitole 4.6.1 byly získány následující výsledky, viz. tab. č. 5.1

Tab. č. 5.1

Proud	Začátek vstupu		Konec vstupu		Nabízená doba zelené
S _A	13		41		28
V _A	0		12		12
V _B	76		95		19
V _C	83		94		11
S _D	81		96		15
V _D	43		68		25
V _E	19		39		20
V _F	17		22		5
T _D	83		88		5
P _A	77		87		10
P _B	12		20		8
P _G	48		100		52
P _D	5		10		5
P _H	21		80		59
P _E	0	81	5	100	24
P _L	4		43		39
Hodnota účelové funkce	1.07623				

Jak je z tab. č. 5.1 patrné hodnota minimální poměrné rezervy činí 1,07623. V praxi to tedy znamená, že pro každý proud vstupující do křižovatky nabízíme minimálně o 7,623% víc než je průměrně požadováno. Hodnoty uvedené ve druhém a třetím sloupci tabulky se vztahují k začátkům a koncům dob zelených pro jednotlivé proudy. Tedy např. pro proud

SA začíná doba zelené na začátku 13.s od začátku cyklu, konec doby zelené pro tento proud nastane na začátku 41.s od začátku cyklu. Pro kontrolní účely jsou dále uvedeny hodnoty vypočítaných poměrných rezerv pro vozidlové proudy, které jsou z hlediska doby zelené časově nejnáročnější, viz tab. č. 5.2 (jsou vynechány chodecké proudy).

Tab. č. 5.2

Proud	Hodnota poměrné rezervy
S_A	15.75
V_A	1.09924
V_B	1.09615
V_C	2.86957
S_D	6.13636
V_D	1.09356
V_E	1.07623
V_F	1.89474
T_D	4.73684

Řešením programu uvedeného v podkapitole 4.6.2 byly získány následující výsledky, viz. tab. č. 5.3

Tab. č. 5.3 :

Proud	Začátek vstupu		Konec vstupu		Nabízená doba zelené
S _A	13		41		28
V _A	0		12		12
V _B	76		95		19
V _C	83		94		11
S _D	81		96		15
V _D	43		68		25
V _E	19		39		20
V _F	17		22		5
T _D	83		88		5
P _A	77		87		10
P _B	12		20		8
P _G	48		100		52
P _D	5		10		5
P _H	21		80		59
P _E	0	81	5	100	24
P _L	4		43		39
Hodnota účelové funkce	0.538117				

Jak je z tab. č. 5.3 patrné hodnota minimální poměrné rezervy tentokrát činí 0,538117. Uvedené výsledky jsou značně problematické, protože je na první pohled jasné, že existuje minimálně jeden proud, pro který není splněn základní požadavek a to dostatečná doba zelené za cyklus na zvládnutí intenzity vozidel. Zatímco výpis hodnot poměrných rezerv u předchozí úlohy byl víceméně formální, u těchto výsledků je nezbytný, protože potřebujeme zjistit, pro které proudy je situace kritická. Hodnoty poměrných rezerv budou opět vypsány pro vozidlové proudy, které jsou z hlediska doby zelené časově nejnáročnější, viz tab. č. 5.4

Tab. č. 5.4 :

Proud	Hodnota minimální poměrné rezervy
S_A	7,875
V_A	0.549618
V_B	0.548077
V_C	1.43478
S_D	3.06818
V_D	0.54678
V_E	0.538117
V_F	0.947368
T_D	2.36842

Jak je z výsledku výpisu hodnot poměrných rezerv patrné, problémy se nevyskytují pouze u jednoho proudu (ke kterému se vztahuje hodnota minimální poměrné rezervy). Situace je nevyhovující u 5-ti proudů, přičemž u čtyřech z nich je poměrně kritická (hodnota poměrné rezervy klesá pod hodnotu 0,55, což znamená, že nenabízíme ani 55% doby zelené, která je průměrně požadována)

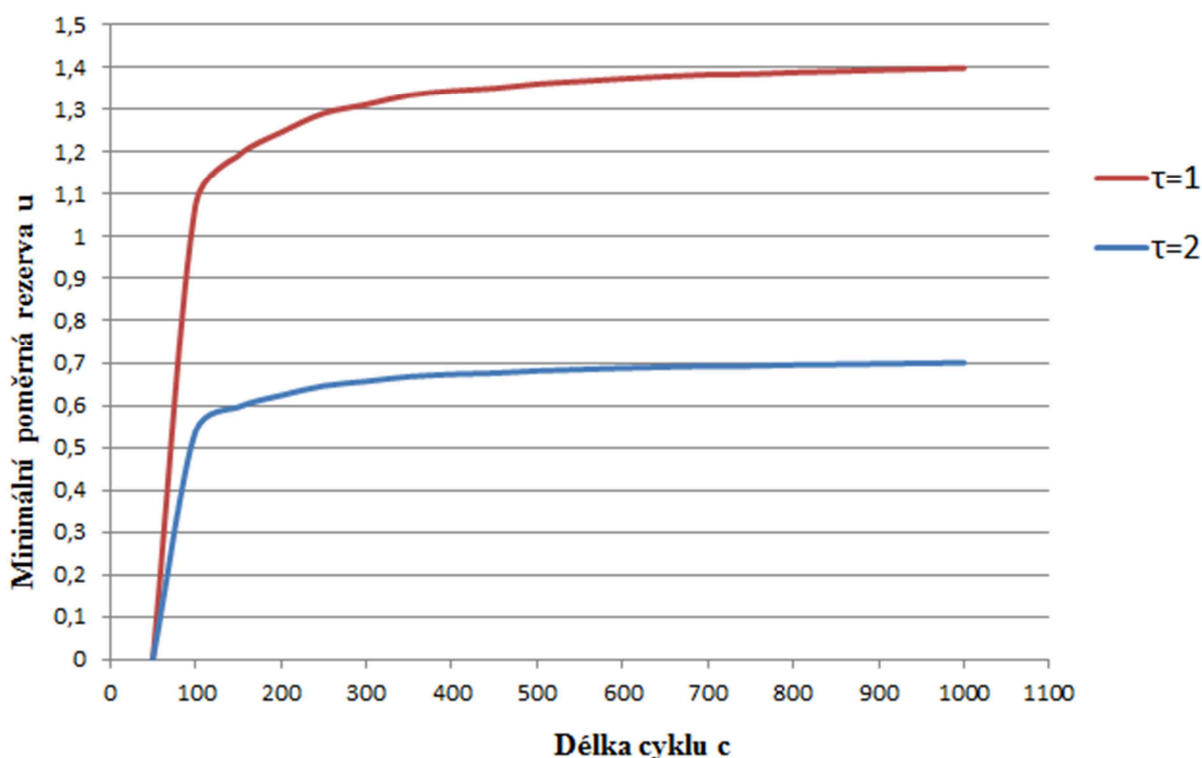
Řešením programu uvedeného v podkapitole 4.7.1 byly získány následující výsledky, viz. tab. č. 5.5

Tab. č. 5.5

Proud	Začátek vstupu		Konec vstupu		Nabízená doba zelené
S _A	0		36		36
V _A	0		13		13
V _B	81		102		21
V _C	78		83		5
S _D	46		79		33
V _D	46		73		27
V _E	20		42		22
V _F	18		33		15
T _D	78		83		5
P _A	82		87		5
P _B	0		47		47
P _G	51		83		32
P _D	0		24		24
P _H	22		61		39
P _E	0	46	6	83	43
P _L	4		38		34
minimální délka cyklu	107 s				

Jako poslední byla řešena varianta matematického modelu, ve které se minimalizovala délka cyklu při hodnotě doby potřebné pro vstup jednotkového vozidla v saturovaném proudu 2s. Byl potvrzen očekávaný fakt a to, že množina přípustných řešení je v této variantě modelu prázdná. To tedy znamená, že tento typ úlohy není při definovaných omezujících podmínkách řešitelný. Tento stav se očekával vzhledem k tomu, že hodnota minimální poměrné rezervy v tomto typu úlohy nedosáhla hodnoty 1, což je jeden ze základních předpokladů uplatněný při konstrukci omezujících podmínek ve variantě minimalizující délku cyklu. U této varianty je tedy bezpředmětné uvádět výpis výsledků.

Jistým způsobem, jak lze nevyhovující situaci z pohledu hodnoty minimální poměrné rezervy alespoň částečně vylepšit, je prodloužit délku cyklu. Za tím účelem byly provedeny výpočetní experimenty, ve kterých se hodnota délky cyklu postupně prodlužovala. Závislost hodnoty minimální poměrné rezervy na prodlužující se délce cyklu pro různé hodnoty τ potřebných pro vstup vozidel do křižovatky v saturovaném proudu je znázorněna na obr. č. 5.1

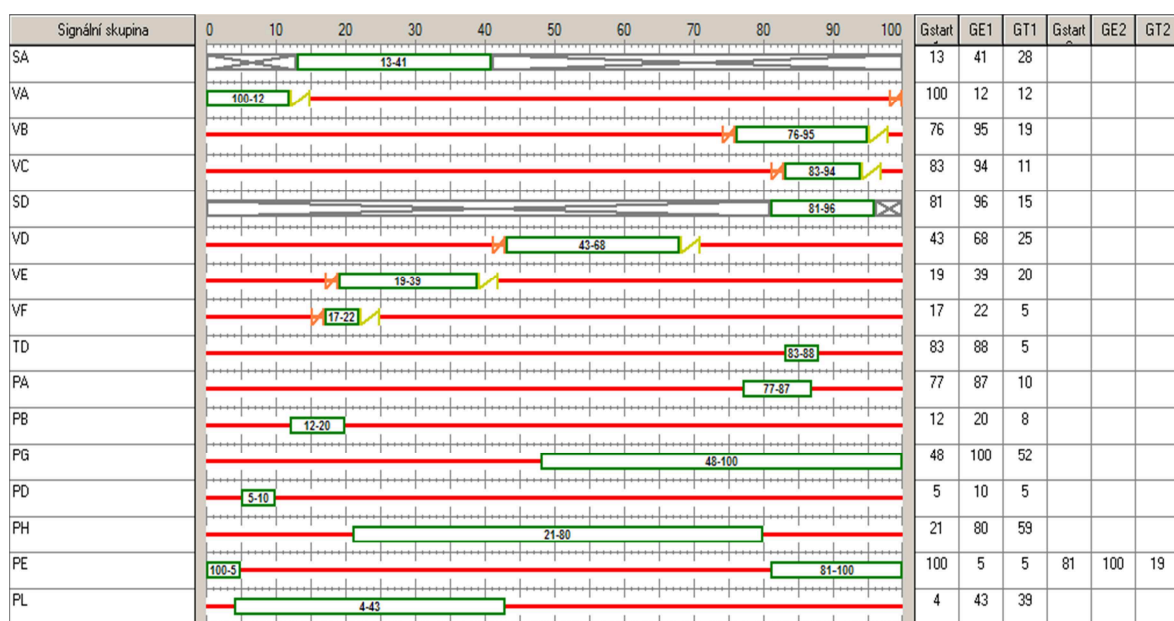


Obr. č. 5.1 : Grafické znázornění závislosti minimální poměrné rezervy na délce cyklu

Jak lze z obr. č. 5.1 vidět, při hodnotě $\tau = 2$ s se nedá očekávat výrazné zlepšení hodnoty minimální poměrné rezervy ani při zvyšující se délce cyklu nad všechny meze. Jistý přínos z pohledu růstu hodnoty minimální poměrné rezervy lze spatřovat cca do hodnoty délky cyklu 600 s. Tak dlouhá délka cyklu však není přípustná z pohledu dopravně - inženýrských zásad, kde je doporučeno volit délku cyklu maximálně ve výši 120 s [TP 81]. Je tedy zřejmé, že ve srovnání s původní délkou cyklu 100 s není při délce cyklu 120 s dosaženo výraznějšího efektu.

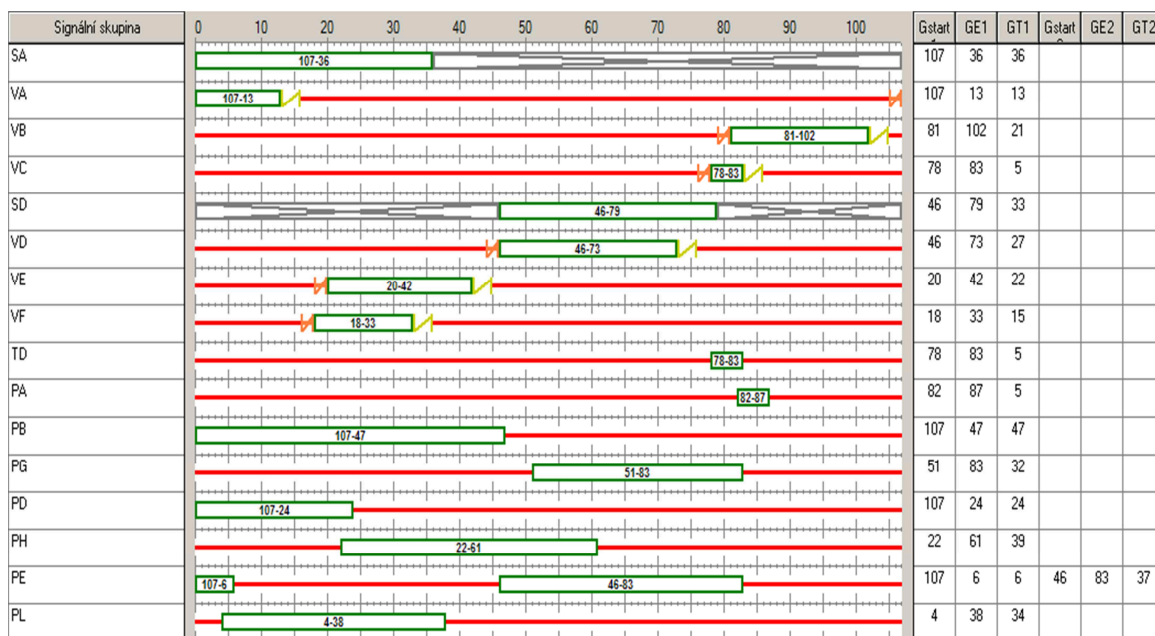
Za účelem lepší prezentace dosažených výsledků budou ještě uvedeny signální plány pro navrženou křižovatku, které byly sestaveny na základě tabulek. Signální plány byly vytvořeny v software Sitraffic P2.

Signální plán při maximalizaci minimální poměrné rezervy a obou hodnotách τ je uveden na obr. č 5.2 (vypočítané hodnoty začátků a konců dob zelených pro jednotlivé proudy jsou totožné)



Obr. č. 5.2 : Signální plán při maximalizaci minimální poměrné rezervy

Signální plán při minimalizaci délky cyklu a hodnotě $\tau = 1 s$ je uveden na obr. č 5.3



Obr. č. 5.3 : Signální plán při minimalizaci délky cyklu

Signální plán při minimalizaci délky cyklu a hodnotě $\tau = 2 s$ není uveden, protože nebylo dosaženo optimálního řešení z důvodu prázdné množiny přípustných řešení.

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu pevného signálního plánu pro zvolenou světelně řízenou a silně zatíženou křižovatku ve městě Ostrava, v městské části Ostrava - Poruba.

V úvodních kapitolách bakalářské práce byly zmíněny některé poznatky obecnějšího charakteru - byly popsány výhody a nevýhody světelného řízení křižovatek, byly stručně charakterizovány jednotlivé metody navržené za účelem sestavy signálních plánů a zmíněny jejich výhody a nevýhody. Z uvedeného spektra návrhových metod byla k řešení vybrána metoda využívající poznatků matematického programování. Je to především z toho důvodu, že je tato metoda pro řešitele z hlediska přijímání konkrétních závěrů velice výhodná (na rozdíl od jiných metod dává řešiteli přímo informaci, ve kterých okamžicích v rámci cyklu mají začínat a končit doby zelených pro jednotlivé proudy) a dále umožňuje vyhledat optimální řešení v rámci skupiny uvedených podmínek. Její základní nevýhodou je, že je pro začínajícího řešitele teoreticky náročnější.

V návrhové práci byla tedy uvedena metoda podrobně popsána a následně implementována do podmínek problémové lokality. Za účelem zjištění vstupních údajů byly provedeny potřebné dopravní průzkumy, přímo získány nebo odhadnuty hodnoty některých vstupních veličin.

Vlastní návrh signálního plánu je proveden variantně. Celkem jsou v předložené práci prezentovány 3 varianty signálního plánu. Všechny varianty se vztahují k období páteční odpolední špičky (v tomto období nastává na křižovatce jedna z nejkritičtějších situací), varianty se od sebe liší zvolenými optimalizačními kritérii a hodnotami některých vstupních údajů.

Na základě získaných výsledků bylo zjištěno, že při určité konfiguraci vstupních dat (zejména jejich pesimistických odhadů) nelze sestavit uspokojivý signální plán, tj takový plán, který by v rámci jednoho cyklu umožňoval splnit průměrné požadavky všech splňujících proudů. Při výskytu těchto nepříznivých vstupních hodnot je nutno konstatovat, že křižovatka v řešeném období není dostatečně propustná.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČERNÁ, Anna; ČERNÝ, Jan. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. 1. vydání. Praha Institut Jana Pernera o.p.s., 2004, 150 s. ISBN 80-86530-15-9
- [2] ČERNÝ, Jan; KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teórie dopravy*. 1. vydání. Bratislava : Veda, 1991, 280 s. ISBN 80-224-0099-8.
- [3] DORDA, Michal. *Studie využití simulačního software witness při návrhu signálního plánu světelně řízené křižovatky*. Perner's Contacts [online]. listopad 2010, roč. 5., č.3., Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Dorda.pdf>
- [4] JANÁČEK, Jaroslav. *Řešení úloh matematického programování na osobních počítačích*. Žilina VŠDS Žilina, 1993, 130 s. ISBN 9788071001164
- [5] KREJČÍ, Lukáš. *Zkušenosti s navrhováním signálních plánů křižovatek metodami Lineárního programování v podmínkách složitých křižovatek*. Perner's Contacts [online]. duben 2011, roč. 6., č.1, Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/23_2011/Krejci.pdf>
- [6] KŘIVDA, Vladislav. *Návrh organizace a řízení provozu na křižovatce s využitím simulace*. Perner's Contacts [online]. listopad 2010, roč. 5., č.3., Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Krivda.pdf>
- [7] KŘIVDA, Vladislav. *Konfliktní situace na okružní křižovatce s dvoupruhovým okružním pásem*. Perner's Contacts [online]. Duben 2011, roč. 6., č.1., Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/21_2011/Krivda.pdf>
- [8] PECHTOR, Slávek. *Návrh signálního plánu křižovatky pomocí metod matematického programování*. Diplomová práce. Žilinská Univerzita v Žilině, 1998, 154 s.
- [9] PIPKOVÁ Blanka., et al. *Dopravní inženýrství: návod pro cvičení*. CVUT. Fakulta stavební. Vyd. 2. Praha : Vydavatelství CVUT, 1994, 144 s. ISBN 80-01-01226-3

- [10] RUSEK, Michal. *Aplikace metod barvení grafů pro určení minimálního počtu fází světelně řízených křižovatek*. Perner's Contacts [online]. duben .2011, roč. 6, č. 1 Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/21_2011/Rusek.pdf>.
- [11] TUREK, Michal. *Příspěvek o možném využívání P/T Petriho sítí při navrhování světelného řízení křižovatek*. Perner's Contacts [online]. listopad 2010, roč. 5., č.3., Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Turek_M.pdf>
- [12] VALEČEK, Lukáš. *Interakce okružní a světelně řízené křižovatky*. Bakalářská práce. VŠB-TU OSTRAVA, 2011, 55 s.
- [13] VEVERKA, Zdenek. *Posouzení organizace dopravy v části ulice Koutníkova a Antonína Dvořáka v Hradci Králové*. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera, 2011, 82 s.
- [14] *Aktualizace výpočtových modelů pro stanovení kapacity okružních křižovatek* Dostupné z: <http://edip.cz/cs/vyzkum/posuzovani-kapacity-okruzni-krizovatky>
- [15] ČSN 73 6102. *Projektování křižovatek na silničních komunikacích*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 180 s
- [16] *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích*. Vyd. 2. Praha: Ministerstvo dopravy. 2006. 124 s. ISBN 80-86502-30-9
- [17] TP 189. *Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích*. Pro EDIP s.r.o., 2007, 52 s. ISBN 978-80-902527-7-6.
- [18] TP 81 *Zásady pro navrhování světelných signalizačních zařízení na pozemních komunikacích*. Vyd. 2. 2006, 124 s. ISBN 80-86502-30-9.
- [19] <http://cross.cz/cs/rizeni-dopravy/cross-rs-4.html>
- [20] <http://gadgets.vtm.zive.cz/semafor-s-odpoctem/a-20561/default.aspx>
- [21] <http://gadgets.vtm.zive.cz/semafory-s-odpoctem/a-2429/default.aspx>
- [22] <http://kony.wz.cz/bariery/akusticke.htm>
- [23] http://praha.idnes.cz/Clanek.aspx?c=A080610_125243_praha_jw

- [24] <http://preference.prazsketramvaje.cz/showpage.php?name=ssz>
- [25] <http://preference.prazsketramvaje.cz/showpage.php?name=technika>
- [26] <http://preference.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2006092901>
- [27] http://ropid.cz/preference/preference-pid__s215x750.html
- [28] <http://ucebnice.euromise.cz/index.php?conn=0§ion=biostat2&node=28>
- [29] <http://www.kooperativa-vod.cz/ocelove-stozary/signalizacni-stozary-pro-semafony/>